

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Porovnání rozměrových parametrů ozubeného kola na
optických měřicích zařízeních**

***Dimensional Parameters Comparison of Gear Wheel on
Optical Measuring Equipments***

Student:

Bc. Velička Martin

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Ostrava, 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Velička**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: Porovnání rozměrových parametrů ozubeného kola na optických
měřicích zařízeních
Dimensional Parameters Comparison of Gear Wheel on Optical
Measuring Equipments

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Přehled současného stavu dané problematiky.
3. Experimentální zkoušky.
4. Zhodnocení experimentů.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] PERNIKÁŘ, J.; TYKAL, M.; VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie, Část metrologie*. Brno : VUT v Brně, 2004. 151 s. ISBN 80-214-1997-0.
- [2] CHRISTOPH, R.; NEUMANN, H. J. *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika*. Uherské Hradiště : L. V. Print Uherské Hradiště, D-80992 München, 2008. 106 s.
- [3] OČENÁŠOVÁ, L. *Príspevok k hodnoteniu odchýlky kruhovitosti pri meraní na súradnicovom meracom stroji*. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline – Strojnícka fakulta. Dizertačná práca, 2008.
- [4] HUMIENNY, Z. a kol. *Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS), Podręcznik europejski*. Warszawa : Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, 2004. 527 s. ISBN 83-204-2954-4.
- [5] RŮŽIČKA, V. *Kontrola ozubených kol s úvodem do geometrického výpočtu ozubení*. Praha : SNTL Praha, 1957, 408 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřisežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 16. 5. 2011

Velická Martin
.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB - TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 16. 5. 2011

Velička Martin
.....

Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Velička

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Pionýrů 1262,
739 11 Frýdlant nad Ostravicí

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VELIČKA, M. Porovnání rozměrových parametrů ozubeného kola na optických měřicích zařízeních: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011, str.74 s. Vedoucí práce: Čep, R.

Diplomová práce je zaměřená na porovnání rozměrových parametrů ozubeného kola na optických zařízeních. Úvodní část je věnována základnímu rozdělení ozubených kol, principů optických i měřicích zařízeních a popisuje používané druhy senzorů. V experimentální části byly porovnané parametry ozubených kol kontaktní a bezkontaktní metodou měření. Naměřené hodnoty byly porovnány, zpracovány statisticky i graficky. Na základě měření a následného vyhodnocení bylo zajištěno, že pro měření ozubených kol je vhodnější použít kontaktní měření z důvodů přesnosti a efektivnosti měření.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

VELIČKA, M. Dimensional Parameters Comparison of Gear Wheel on Optical Measuring Equipments: Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of machining and assembly, 2011, str. 74 s. Thesis head: Čep, R.

The diploma thesis is focused on comparing the dimensional parameters of the gear wheel on optical devices. The introductory section is devoted to basic type of gear wheels and its differentiation, the principles of optical and measuring devices used and it describes utilised types of sensors. In the experimental part of the thesis the parameters of gear wheels set by contact method were compared to the parameters set by contactless measurement method. The measured values were compared, statistically processed and graphically displayed. Based on the measurement and subsequent evaluation, it was found that for measurement of gear wheels is better to use contact measurement method according to accuracy and measurement efficiency.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	8
ÚVOD	10
1. OZUBENÉ PŘEVODY	11
1.1 ROZDĚLENÍ OZUBENÝCH PŘEVODŮ	11
1.2 ZÁKLADNÍ POJMY OZUBENÍ	13
1.3 GEOMETRICKÉ PARAMETRY ČELNÍHO NEKORIGOVANÉHO OZUBENÍ S PŘÍMÝMI ZUBY	16
1.4 ODCHYLKY OZUBENÝCH KOL	18
1.4.1 Odchylka čelní rozteče	19
1.4.2 Odchylka profilu	20
1.4.3 Házení	21
1.4.4 Odchylka boční křivky	22
1.5 NORMY TÝKAJÍCÍ SE MĚŘENÍ OZUBENÝCH KOL	23
2. MĚŘÍCÍ METODY OZUBENÝCH KOL	24
2.1 OPTICKO DOTYKOVÁ MĚŘÍCÍ TECHNIKA	24
2.2 KONSTRUKCE STROJŮ A PRINCIPY MĚŘENÍ	24
2.3 SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE S KŘÍŽOVÝM STOLEM	25
2.4 SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE S PORTÁLEM	25
2.5 SENZORY PRO SOUŘADNICOVÉ MĚŘÍCÍ STROJE	26
2.5.1 Vizualní senzory	27
2.5.2 Hranový senzor	27
2.5.3 Senzor na zpracování obrazu	28
2.5.4 Senzor měřící vzdálenost	28
2.5.5 Laserové bodové senzory	29
2.5.6 Dotykové senzory	30
2.5.7. Měřicí dotykově optický senzor	31
2.6 PŘESNOST MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ A MĚŘENÍ	32
2.7 CHYBY MĚŘENÍ	32
2.7.1 Systematické chyby	33
2.7.2 Náhodné chyby	34
2.7.3 Hrubé chyby	34
2.8 NEJISTOTA MĚŘENÍ	35
2.9 VLIV NA PŘESNOST MĚŘENÍ	36
2.9.1 Vliv prostředí	37
2.9.2 Vliv měřeného objektu	37
2.9.3 Vliv měřicího zařízení	37
3. KONTAKTNÍ SKENERY	38

4. BEZKONTAKTNÍ SKENERY	38
4.1 TRIANGULAČNÍ PRINCIP	39
4.2 3D LASEROVÉ SKENERY TIME-OF-FLIGHT	39
4.3 FOTOGRAMETRIE	40
4.4 VÝSTUPNÍ DATA 3D SKENOVÁNÍ	40
4.4.1 Síť bodů	40
4.4.2 Mesh	41
5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	42
5.1 MĚŘENÉ OZUBENÉ KOLO	42
5.1.1 Naměřené parametry ozubeného kola	42
5.1.2 Výpočet zbývajících parametru ozubeného kola	42
5.2 MĚŘENÍ SOUČÁSTKY NA PŘENOSNÉM OPTICKÉM SOUŘADNICOVÉM MĚŘÍCÍM STROJI ACTIRIS 350 ..	43
5.3 MĚŘENÍ SOUČÁSTKY NA MULTISENZOROVÉM SOUŘADNICOVÉM MĚŘÍCÍM STROJI WERTH –	
VIDEOCHECK IP 250 3D CNC	46
5.3.1 Měření dotykovou sondou Renishaw MIP	47
5.3.2 Měření bezkontaktní metodou	48
5.4 MĚŘENÍ SOUČÁSTKY NA MULTISENZOROVÉM SOUŘADNICOVÉM MĚŘÍCÍM STROJI WERTH – INSPECTOR	
FQ A STEREOSCAN 3D – BREUCKMANN	49
5.4.1 Kontaktní měření na multisenzorovém měřicím stroji Werth – Inspector FQ	49
5.4.1.1 Měření obvodového házení na hlavovové a patní kružnici	53
5.4.1.2 Měření celkové odchylky profilů - evolventa	59
5.4.2 Optické měření na stereoSCAN 3D – BREUCKMANN	60
5.4.2.1 Statistické vyhodnocení odchylky obvodového házení na hlavové kružnici	63
5.4.2.2 Vyhodnocení odchylky evolventy při optickém 3D skenování	66
6. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	67
ZÁVĚR	71
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	72
SEZNAM PŘÍLOH	73

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	jednotka
1D	1 Dimension – jednorozměrný	[mm]
2D	2 Dimension – dvourozměrný	[mm]
3D	3 Dimension – trojrozměrný	[mm]
a	osová vzdálenost převodů	[mm]
ASC	formát souborů	
b	šířka ozubení	[mm]
c	hlavová vůle	[mm]
c*	jmenovitá hlavová vůle	[mm]
CAD	Computer Aided Desing / Počítačem podporované projektování	
CAM	Computer Aided Manufacturing / Počítačem podporované obrábění	
CMM	Coordinale Measuring Machine / Souřadnicový měřicí stroj	
CNC	Computer Numerical Control / Číslicově řízený počítačem	
ČSN	Česká státní norma	
d	průměr roztečné kružnice	[mm]
d_a	průměr hlavové kružnice	[mm]
d_b	průměr základní kružnice	[mm]
d_f	průměr patní kružnice	[mm]
f_{fa}	odchylka tvaru profilu	[cm]
f_{fβ}	odchylka tvaru boční křivky	
f_{Hα}	odchylka úhlu profilu	[cm]
f_{Hβ}	odchylka sklonu boční křivky	[cm]
f_{pk}	součtová odchylka k rozteče	[cm]
F_{pk max}	celková součtová odchylka k rozteče	[cm]
f_{pt}	jednotlivá odchylka rozteče	[cm]
F_r	odchylka obvodového radiálního házení	[cm]
F_{r max}	maximální odchylka obvodového radiálního házení	[cm]
F_{r min}	minimální odchylka obvodového radiálního házení	[cm]
F_α	celková odchylka profilu	[cm]
F_β	celková odchylka boční křivky	[cm]
h_a	výška hlavy zubů	[mm]
h_a*	jmenovitá výška hlavy zubů	[mm]

h_f	výška paty zubů	[mm]
h_f^*	jmenovitá výška paty zubů	[mm]
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci	
j	boční vůle	[mm]
JR	jmenovitý rozměr	
k	koeficient rozšíření	
L_a	úsek profilu	[mm]
L_β	úsek boční křivky	[mm]
m	modul	
MPE	největší dovolená chyba SMS	[cm]
n	počet měření	
O	obvod roztečné kružnice	[mm]
p	rozteč	[mm]
SMS	souřadnicový měřicí stroj	
STL	formát souborů	
u	standardní nejistota měření	
u_A	standardní nejistota typu A	[cm]
u_B	standardní nejistota typu B	[cm]
u_C	kombinovaná standardní nejistota	[cm]
x, y, z	souřadnice os	
x_i	jednotlivé naměřené hodnoty vstupní veličiny X	[mm]
${}_n\mathbf{x}$	naměřená hodnoty	[mm]
${}_s\mathbf{x}$	skutečná hodnota	[mm]
\bar{x}	aritmetický průměr	[mm]
z	počet zubů	
z_{\min}	minimální počet zubů	
α	úhel profilu zubů	[°]
ε	náhodná chyba	[mm]
Δ	systematická chyba	[cm]
ξ	absolutní chyba měření	[mm]
$\frac{\partial f}{\partial X_i}$	parciální derivace funkční závislosti výstupní veličiny podle jednotlivých vstupních veličin, tzv. váhový koeficient	

Ostatní symboly a jejich význam jsou uvedené přímo v textu

Úvod

Současný vývoj a výzkum techniky se ubírá velmi rychlým krokem. Na podniky jsou neustále kladené vysoké nároky z hlediska kontroly, kvality výrobku a měřicí techniky, které jsou neoddělitelnou součástí výrobního procesu. Firmy jsou nucené k tomu, aby jednou tak náročnějšímu zákazníkovi byl dodán výrobek, který uspokojuje jeho potřeby. Taktéž jsou kladené podmínky konkurovat dalším firmám, aby výrobek byl dodán v co nejkratším čase, v požadované kvalitě a za nízkou cenu. Splnění těchto požadavků zabezpečí podniku přežití mezi konkurencí.

V rychle se rozvíjejícím strojírenství jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu a přesnost při výrobě ozubených kol.

Ze základních definicí tolerovány pro geometrickou přesnost je obvodové házení a celková odchylka profilu. Při měření ozubených kol se používají různé měřicí metody a měřicí přístroje, od univerzálních až po velmi přesné měřicí přístroje. V poslední době se rozvíjejí optické měřicí přístroje a dostávají se tak do popředí díky urychlení práce. Diplomová práce se zabývá nejen měřením na optických měřicích přístrojích ale i také samotným principem přístrojů a zařízení.

I když se v dnešní době stále více prosazuje optické měření nad dotykovým měřením, stále však dotykové měření hraje významnou roli ve firmách. Proto v experimentální části bylo měřeno obvodové házení a celková odchylka profilu jak na přístrojích měřících dotykovou metodou, tak na přístrojích optických. Hodnoty měření nám poté umožnily vzájemné porovnání a vyhodnocení.

1. Ozubené převody

Ozubená kola jsou velmi důležité strojní součásti. Jsou to tělesa, která mají na svých pracovních plochách zákonitě uspořádané zuby, jež mohou při záběru přenášet krouticí momenty nebo otáčivé pohyby z hnacího hřídele na druhý hřídel.

Známe-li smysl přenášené síly, označujeme ozubené kolo, od něhož pohyb vychází, jako hnací a druhé kolo, které tento pohyb přejímá, jako hnané kolo. Použije-li se místo jednoho kola ozubeného hřebenu mění se otáčivý pohyb v pohyb přímočarý, nebo naopak. Kolo a s ním zabírající druhé kolo (protikolo – jedno nebo několik) označujeme též jako pastorek a kolo; jsou-li jejich osy spojeny rámem nebo nosičem satelitů, tvoří soukolí. [6]

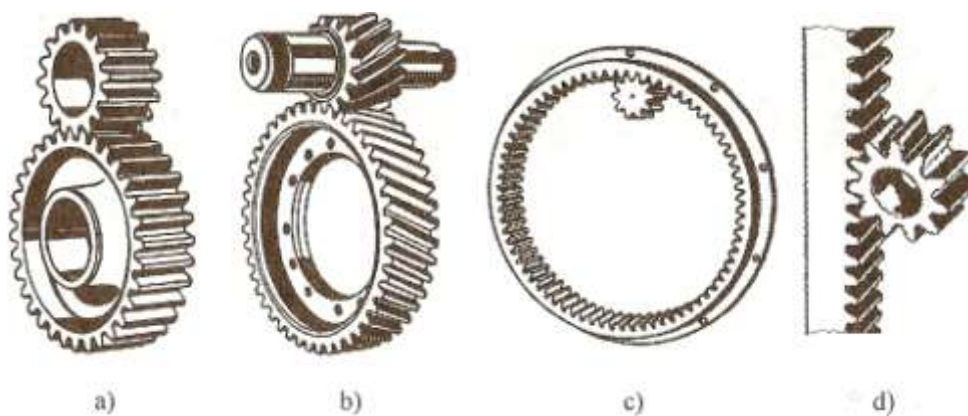
1.1 Rozdělení ozubených převodů

Ozubené převody (soukolí) možno rozdělit podle několika hledisek:

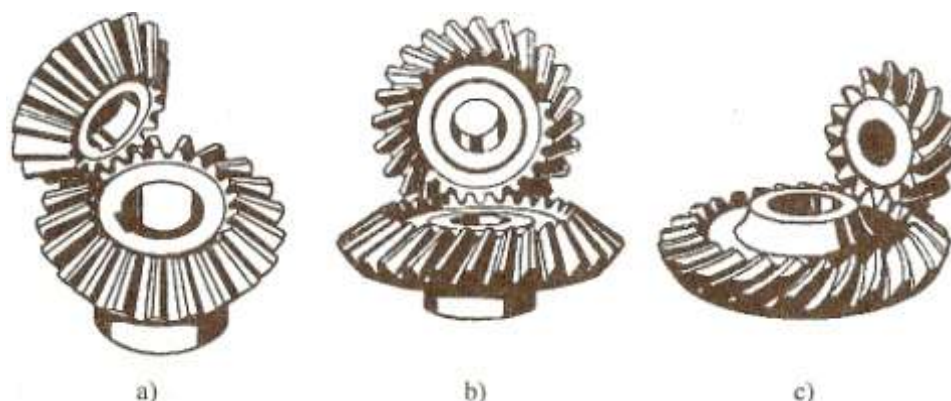
- podle vzájemné polohy os:
 - s rovnoběžnými osami - čelní soukolí (*obr. 1a – d*),
 - s různoběžnými osami - kuželové soukolí (*obr. 2a – c*),
 - s mimoběžnými osami - šroubové soukolí (*obr. 3a*),
 - závitové soukolí (*obr. 3b*),
 - hypoidní soukolí (*obr. 3c*),
 - spirálové soukolí (*obr. 3d*),
- podle polohy ozubení:
 - s vnějším ozubením (*obr. 1a*),
 - s vnitřním ozubením (*obr. 1c*),
- podle druhu křivky profilu zubu s ozubením:
 - evolventní,
 - cykloidní,
 - zvláštní,

- podle tvaru boční křivky zubu se zuby:
 - přímé,
 - šikmé,
 - zakřivené,
 - šípové,
- podle korekcí:
 - normální (bez korekcí, nekorigované),
 - korigované,
- podle konstrukce převodů:
 - jednoduché soukolí s dvojicí ozubených kol
 - soukolí s vloženými koly
 - planetové soukolí

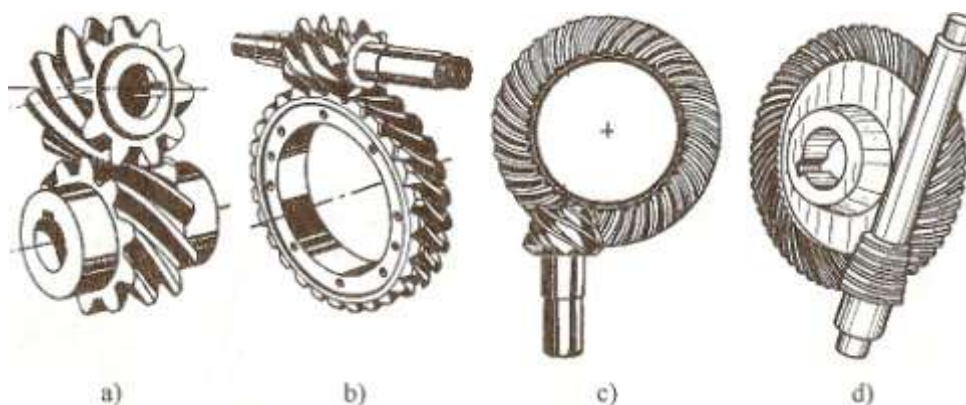
Nejčastější používané soukolí pro rovnoběžné osy hřídelí jsou čelní soukolí s válcovými koly, s vnějším evolventním ozubením s přímými nebo šikmými zuby (*obr. 1a,b*). Relativně lehká a přesná výroba a montáž. [6]



Obr. 1. Čelní soukolí: a) s přímými zuby, b) se šikmými zuby, c) s vnitřními přímými zuby, d) ozubený hřeben – ozubený pastorek [5]

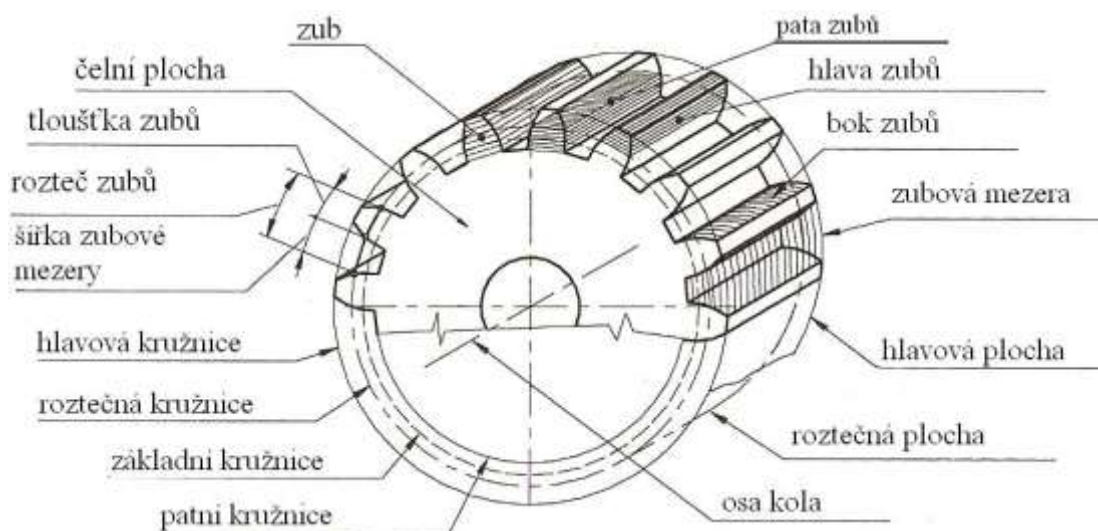


Obr. 2. Kuželové soukolí: a) s přímými zuby, b) se šikmými zuby, c) se zakřivenými zuby[5]



Obr. 3. Soukolí s mimoběžnými osami: a) šroubové, b) závitové, c) hypoidní, d) spirálové[5]

1.2 Základní pojmy ozubení



Obr. 4. Ozubené kolo – základní pojmy [6]

Názvosloví a definice pojmů evolventního ozubení obsahuje ČSN 01 4602-2 *Názvosloví ozubených převodů. Převody s čelními koly* a ČSN 01 4602-3 *Názvosloví ozubených převodů. Převod s kuželovými koly*.

Zub – základní element ozubení, výstupek na ozubeném členu, který zabezpečuje převod pohybu působením výstupku (zubů) druhého ozubeného členu. Skládá se z *paty zubů* a *hlavy zubů*. Zub je ohraničený *hlavovou plochou*, *patní plochou*, dvěma, podle evolventy zakřivení *boky zubů* a dvěma *čelními plochami* ozubeného kola. Zuby jsou v pravidelných roztečích podle *roztečné plochy* ozubeného členu, resp. Po obvodě celého kola.

Těleso – část ozubeného kola, která s ozubením tvoří ozubené kolo.

Souosá plocha – rotační plocha, jejichž osa je totožná s osou ozubeného kola.

Roztečná plocha – základní vztažná plocha ozubení. Je to souosá plocha ozubeného kola, která je základnou na určení prvku zubů, jejich rozměru a rozmístění. Roztečná plocha u čelních ozubených kol je válcová, u kuželových kuželová. Rozděluje zub na hlavu zubu a patu zubu.

Roztečná kružnice – myšlená kružnice, roztečná plocha zobrazena v rovině kolmo na osu rotace.

Hlavová plocha – souosá válcová plocha ohraničující ozubené kolo na protilehlé straně tělesa ozubeného kola, tvoří plochy vrcholů zubů. U vnějšího ozubení ohraničuje ozubené kolo na jeho největším průměru.

Hlavová kružnice – zobrazení hlavové plochy v čelní rovině, kružnice opisuje ozubení přes vrcholy zubu.

Patní plocha – souosá plocha, která odděluje ozubení od tělesa ozubeného kola.

Patní kružnice – zobrazení patní plochy v čelní rovině, kružnice spojující všechny dna zubové mezery.

Hlava zubů – část zubů mezi roztečnou a hlavovou plochou.

Pata zubů – část zubů mezi patní a roztečnou plochou

Zubová mezera – prostor mezi dvěma sousedními zuby jednoho kola ohraničené hlavovou a patní plochou.

Bok zubů – plocha, která ohraničuje zub ze strany zubové mezery. Jeho součástí je pracovní plocha zubů, kterou se zub dotýká zubu spoluzabírajícího kola. Je tvořen evolventní plochou (v čelní rovině evolventou), která vzniká jako obálka polohy tvořící roviny (v čelní rovině přímka) při jejím válení po základní ploše (v čelní rovině základní kružnice). Průsečnice plochy boku zubu a roztečné plochy se nazývá *roztečná boční křivka zubů*.

Základní plocha – souosá plocha, po které se odvaluje tvořící rovina při vytváření evolventní plochy boku zubů. U čelních kol je válcová plocha, u kuželových kuželová.

Základní kružnice – zobrazení základní plochy v čelní rovině. Kružnice, po které se odvaluje tvořící přímka při vytváření evolventy boku zubů.

Čelní plocha ozubení – jedná z ploch ohraničujících šířku ozubení.

Profil boku zubů – průsečnice boku zubů s jinou plochou, např. čelní profil odpovídá čelnímu řezu plochou boku zubů.

Tloušťka zubů – vzdálenost mezi nerovnoběžnými profily boku zubů na oblouku soustředné kružnice ozubeného kola, např. *roztečná tloušťka zubu* je délka oblouku na roztečné kružnici mezi dvěma body, ve kterých roztečná kružnice protíná protilehlé profily boku zubů.

Šířka zubové mezery – vzdálenost mezi nejbližšími nerovnoběžnými profily boku sousedních zubů na oblouku soustředné kružnice ozubeného

kola, např. *roztečná šířka zubové mezery* je délka oblouku roztečné kružnice mezi dvěma body, ve kterých roztečná kružnice přetíná nejbližší protilehlé profily boku dvou sousedních zubů. [6]

1.3 Geometrické parametry čelního nekorigovaného ozubení s přímými zuby

U čelního nekorigovaného ozubení s přímými zuby se všechny geometrické parametry určují a měří v čelní rovině, resp. v libovolné rovině rovnoběžné s čelní plochou ozubení.

Základní parametry a rozměry ozubení *obr. 5.* se určují následujícími definicemi a vztahy:

Počet zubů – určuje se podle funkce stroje výpočtem převodového poměru. Minimální počet zubů je $z_{\min} = 17$, menší počet zubů je možný jen tehdy, když se pro méně náročné aplikace připustí jisté podřezání zubů, potom $z'_{\min} = 14$, nebo se použije korigované ozubení.

Modul ozubení m (mm) – charakteristické číslo určující velikost profilu zubů, určuje se pevnostními výpočty. Z modulu se určuje většina ostatních rozměrů ozubení. Hodnoty modulu jsou normalizované v ČSN 01 4608 – *Ozubená kola. Moduly*. Normalizované hodnoty modulu jsou odstupňované:

0,1; 0,11; **0,12**; 0,14; **0,15**; 0,18; **0,2**; 0,22; **0,25**; 0,28; **0,3**; 0,35; **0,4**; 0,45; **0,5**; 0,55; **0,6**; 0,7; **0,8**; 0,9; **1**; 1,125; **1,25**; 1,375; **1,5**; 1,75; **2**; 2,25; **2,5**; 2,75; **3**; 3,5; **4**; 4,5; **5**; 5,5; **6**; 7; **8**; 9; **10**; 11; **12**; 14; **16**; 18; **20**; 22;...

Přičemž moduly tučně označené jsou přednější.

Rozteč zubů p (mm) – vzdálenost rovnoběžných dvou sousedních zubů měřená na oblouku roztečné kružnice. Rozteč zubů spoluzabírajících kol musí být stejná

$$p_1 = p_2 = p = \pi \cdot m \quad (\text{mm}) \quad (1.1)$$

Poté můžeme vyjádřit obvod roztečné kružnice

$$O = \pi \cdot d = p \cdot z \quad (\text{mm}) \quad (1.2)$$

možno potom napsat pro průměr roztečných kružnic vztah

$$d = \frac{p \cdot z}{\pi} = \frac{\pi \cdot m \cdot z}{\pi} = m \cdot z \quad (\text{mm}) \quad (1.3)$$

Výška hlavy zubu závisí na hodnotě modulu ozubení a jednotkové výšce hlavy zubu

$$h_a = h_a^* \cdot m \quad (\text{mm}) \quad (1.4)$$

Jednotková výška hlavy zubů je poměr výšky hlavy zubů a modulu ozubení

$$h_a^* = 1,0 \quad (1.5)$$

Výška paty zubů závisí na hodnotě modulu ozubení a jednotkové výšce paty zubů

$$h_f = h_f^* \cdot m \quad (\text{mm}) \quad (1.6)$$

Jednotková výška paty zubů je poměr výšky paty zubu a modulu ozubení

$$h_f^* = 1,25 \quad (1.7)$$

Průměr hlavové kružnic

$$d_a = d + 2 \cdot h_a = d + 2 \cdot (h_a^* \cdot m) = d + 2 \cdot (1,0 \cdot m) \quad (\text{mm}) \quad (1.8)$$

Průměr patní kružnice

$$d_f = d - 2 \cdot h_f = d - 2 \cdot (h_f^* \cdot m) = d - 2 \cdot (1,25 \cdot m) \quad (\text{mm}) \quad (1.9)$$

Hlavová vůle – vzdálenost mezi hlavovou plochou jednoho ozubeného kola a patní plochou druhého ozubeného kola

$$c = c^* \cdot m \quad [\text{mm}] \quad (\text{mm}) \quad (1.10)$$

Jednotková hlavová vůle – poměr hlavové vůle a hodnota modulu ozubení

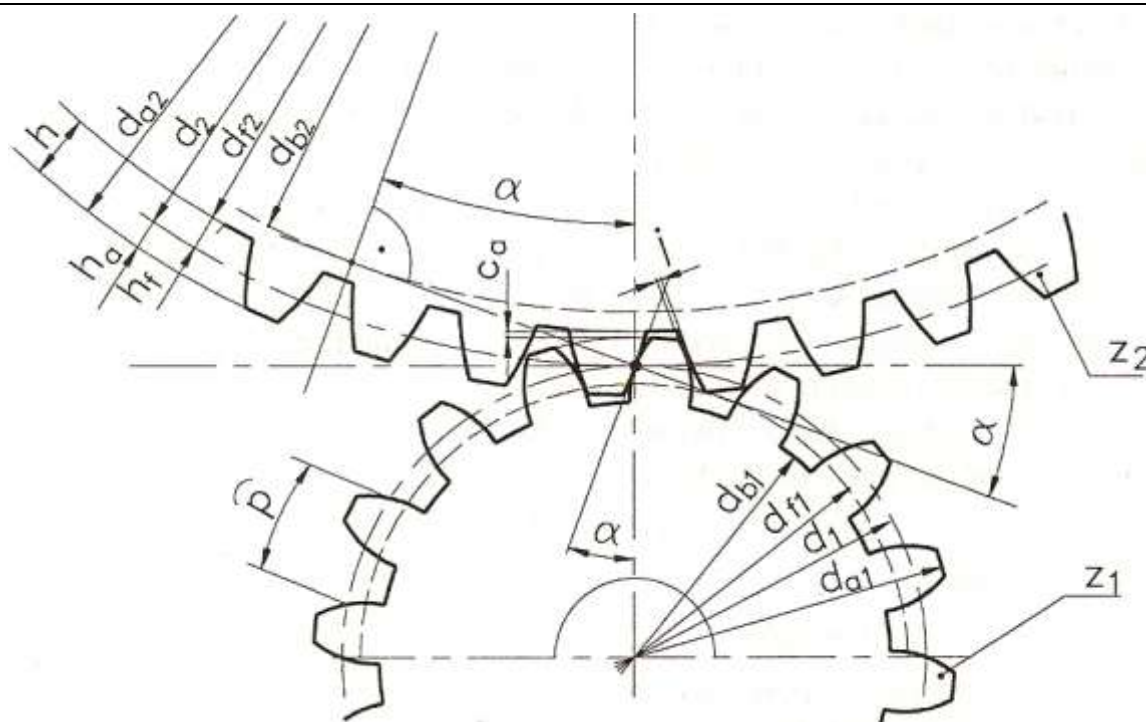
$$c^* = 0,25 \quad (1.11)$$

Úhel profilu zubů (úhel záběru) – ostrý úhel mezi dotykovou plochou profilu zubů v bodě na roztečné kružnici a spojnicí tohoto bodu s osou ozubeného kola. Hodnota úhlu je normalizovaná $\alpha = 20^\circ$.

Boční vůle j – mezera mezi nezatěžujícími boky spoluzabírajících kol, je nutná kvůli výrobním a montážním nepřesnostem a teplotních dilatacím.

Vzdálenost os ozubeného převodu a – nejmenší vzdálenost os kol ozubeného soukolí

$$a = 0,5 \cdot (d_1 + d_2) = 0,5 \cdot (z_1 + z_2) \cdot m \quad (\text{mm}) \quad (1.12)$$



Obr. 5. Základní geometrické parametry ozubeného soukolí [6]

1.4 Odchylky ozubených kol

Ozubené kola patří mezi důležité strojní součástky. Ozubený převod je tvořen sružením dvou ozubených kol, resp. spoluzabírající boků profilu zubů. Kvalita funkcí ozubených kol je dána dodržením požadovaných kinematických vlastností převodu a kvalitou potřebného styku funkčních ploch zubů k přenosu zatížení. Tím, že ozubený převod netvoří kinematickou dvojici s opačně tvarovanou součástí (jako je tomu např. u hřídele a díry, šroubu a matice), ale jako součástka toho stejného tvaru, přesnost a vzájemná zaměnitelnost patří mezi normované parametry.

Účinnost, plynulost chodů, kinematická přesnost ozubených převodů je zabezpečena požadavky na:

- přesnost a správnost tloušťky zubů,
- přesnost a správnost geometrického tvaru zubu a kvality jeho povrchu,
- minimální radiální a axiální házení,
- přesnost uložení kola na hřídeli

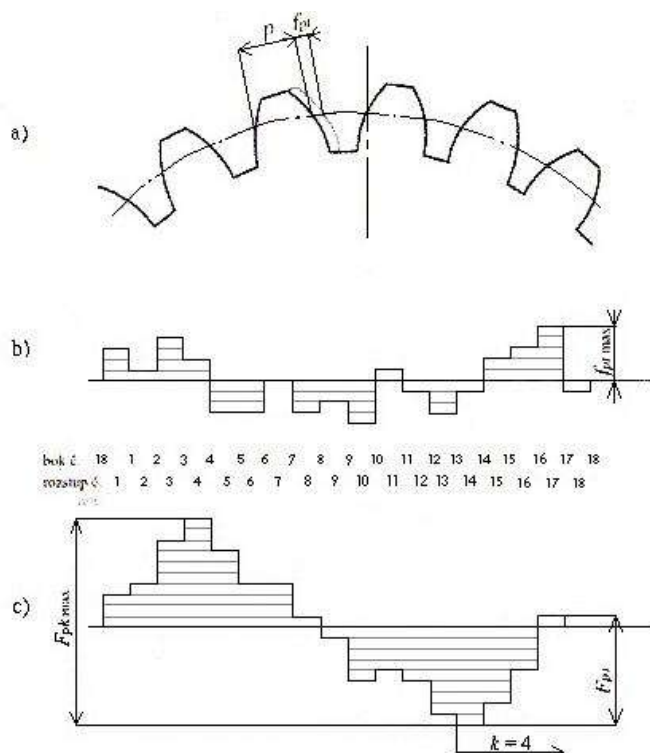
Norma ČSN ISO 1328-1 (014682) rozlišuje osm stupňů přesnosti ozubených kol, které jsou předepisované v závislosti na použití ozubených soukolí a jeho obvodové rychlosti. Dovolené odchylky se týkají rozměrů, geometrického tvaru zubů a vzájemné polohy prvků soukolí. Lícovací soustava je založena na jednotné vzdálenosti os soukolí pro rozsah modulů $m=(0,3 \text{ až } 12,5) \text{ mm}$, průměry roztečných kružnic do 1600 mm a vzdálenosti os převodu do 1600 mm.

V každém stupni přesnosti je pět skupin bočních vůli, označovaných písmeny a až e . Boční vůle je určovaná na základě tepelných poměrů ozubeného soukolí. Ve výkresové dokumentaci se předpisuje lícování číslem stupně přesnosti a písmenem boční vůle např. 3c. [7]

1.4.1 Odchylka čelní rozteče

Norma ISO 1328-1 (Soustava přesnosti ISO 1. část. Definice a dovolené hodnoty odchylek rovnolehlých zubů) definuje tři odchylky čelního rozstupu zubů

- jednotlivou odchylku rozteče – f_{pt} ,
- součtovou odchylku k rozteče – F_{pk} ,
- celkovou součtovou odchylku rozteče – $F_{pk \max}$



Obr. 6. Odchylky čelní rozteče a) jednotlivá odchylka čelní rozteče, b) sloupkový diagram jednotlivých odchylek čelní rozteče, c) sloupkový diagram součtové odchylky k rozteči. [7]

Součtová odchylka k rozteče F_{pk} v úseku rozsahu k rozteče je matematickým rozdílem mezi skutečnou délkou a teoretickou délkou příslušného oblouku. Je rovná matematickému součtu jednotlivých odchylek rozteče z těch jistých k roztečí.

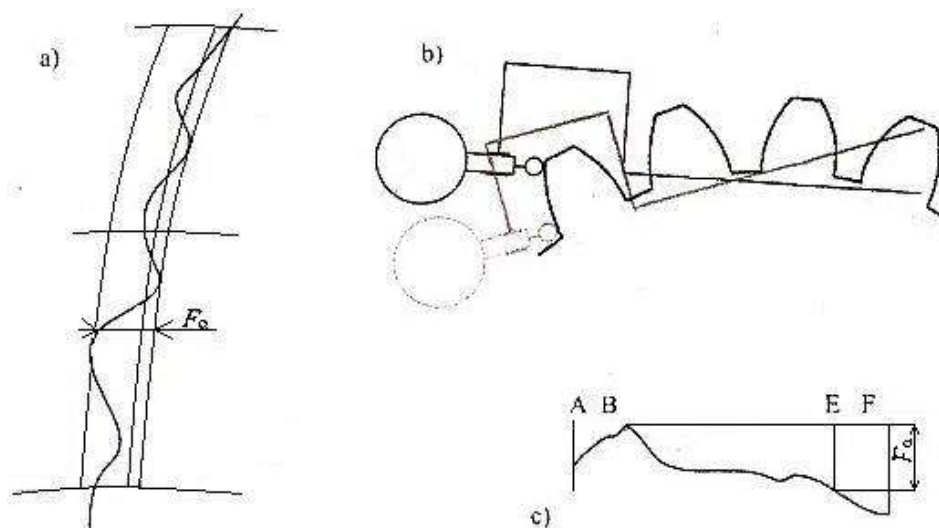
Celková součtová odchylka rozteče kola $F_{pk \max}$ je největší součtovou odchylkou rozteče kola pro libovolné příslušné boky ozubeného kola. Je to rozdíl mezi skutečnou a teoretickou délkou oblouku mezi těmito dvěma příslušnými boky, které s odhadem na ideální kruhové dělení mají největší odchylku či už v kladném nebo záporné smyslu od jejich teoretické polohy. [7]

1.4.2 Odchylka profilu

ČSN ISO 1328-1(014682) definuje odchylky profilu jako kolmé odchylky k profilu zubu v čelní rovině, měřené ve vyhodnocovaném úseku profilu L_a . V grafickém záznamu odchylek se vyhodnocuje:

- Celková odchylka profilu – F_a , obr. 7.
Je to vzdálenost mezi dvěma teoretickými profily, které tvoří obálku ke skutečnému profilu na vyhodnocovaném úseku L_a .
- Odchylka tvaru profilu – f_{fa} .
Je to vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými profily k středovému profilu ohraničující skutečný profil na vyhodnocovaném úseku L_a .
- Odchylka úhlu profilu – f_{Ha} .
Je to vzdálenost mezi dvěma teoretickými profily, které protínají středový profil v koncových bodech vyhodnocovaného úseku L_a . Odchylka úhlu profilu se považuje za kladnou, jako středový profil v teoretickém profilu má vzestupný charakter směrem k hlavě zubu.

Měření odchylek profilu je uskutečňované pomocí přístrojů na měření evolventy. Grafický záznam se získává odvaalem dotyku po profilu boku zubu, vždy směrem od paty k hlavě zubu. Princip měření spočívá v porovnávání skutečného (měřeného) profilu s teoretickým profilem. Vyhodnocuje se jako největší vzdálenost mezi obalovaným a skutečným profilem. [7]



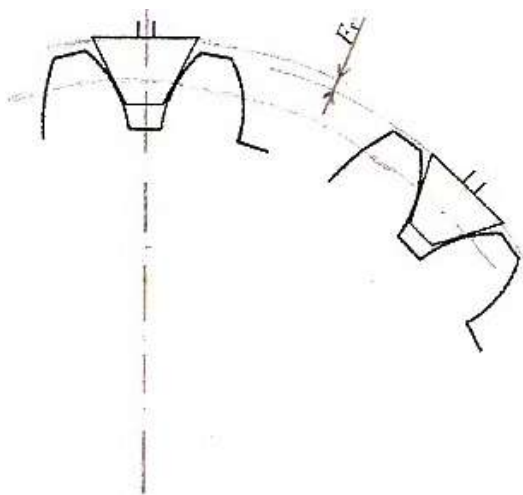
Obr. 7. Celková odchylka profilu

a) definice, b) měření na evolventoměru, c) grafický záznam [7]

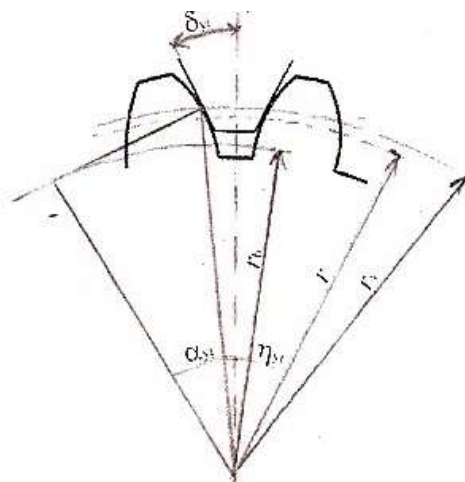
1.4.3 Házení

Definice radiálního házení F_r je na obr. 8. Radiální házení se měří v zubové mezeře a to v blízkosti roztečné kružnice anebo na hlavové kružnici ozubeného kola vhodným snímačem s prizmatickým tvarem dotyku (parametry potřebné pro výpočet úhlu prizmy jsou na obr. 9., kuličkovým anebo válcovým dotykem. Radiální házení má sinusový průběh. Odčítané hodnoty však nezávisí jen od radiálního házení zubové mezery, ale i od odchylek profilu, odchylek boční křivky a radiálního házení měřicího trnu. Velikost radiálního házení je rozdíl mezi maximální a minimální polohou snímače s vhodným dotykem.

Systém radiální souhrnné přesnosti má odlišné rozsahy stupňů, jako jsou v ISO 1328-1. Zahrnuje 9 stupňů přesnosti, přičemž 4. stupeň je nejvyšší přesnost a 12. stupeň je nejnižší. ISO 1328-2 udává závislost dovolených odchylek od valu a boční vůle na průměru roztečné kružnice a normálovém modulu. [7]



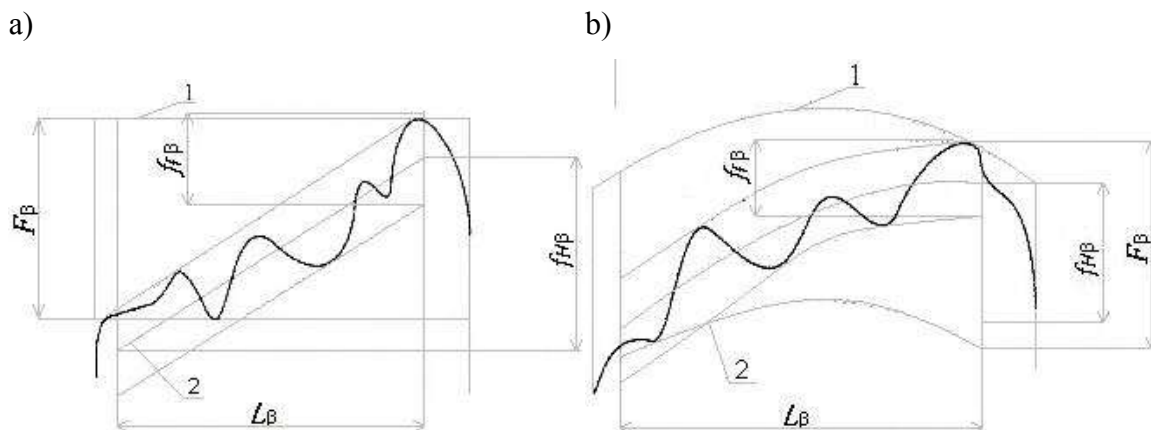
Obr. 8. Schéma měření ozubení [7]



Obr. 9. Parametry prizmatického dotyku [7]

1.4.4 Odchylka boční křivky

Celková odchylka boční křivky F_β na obr.10. je definována jako vzdálenost mezi dvěma vypočítanými bočními křivkami, které tvoří obálku skutečné boční křivky ve vyhodnocovaném rozsahu, jako je tato vzdálenost měřená v příčné rovině a je tangenciální k základnímu válci. Většina moderních přístrojů na měření evolventy dokáže měřit celkovou odchylku boční křivky. [7]



Obr. 10. Celková odchylka boční křivky a její složky

a) nemodifikovaná boční křivka, b) modifikovaná boční křivka

1 – jmenovitá boční křivka, 2 – střední boční křivka

Celková odchylka boční křivky F_β obsahuje dvě složky:

- Odchylku sklonu boční křivky $f_{H\beta}$.

Je to vzdálenost mezi dvěma teoretickými bočními křivkami, která přetíná střední boční křivku v nejkrajnější mezních hodnotách ve vyhodnocovaném úseku boční křivky L_β .

- Odchylku tvaru boční křivky $f_{f\beta}$.

Je to vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými teoretickými bočními křivkami k střední boční křivce, které tvoří obálku ke skutečné boční křivce na vyhodnocovaném úseku boční křivky L_β . [7]

1.5 Normy týkající se měření ozubených kol

Pro ozubená kola platí tyto ISO normy:

- ISO 53:1997 – Čelní ozubená kola. Základní profil.
- ISO 54:1997 – Čelní ozubená kola. Moduly a rozteče.
- ISO 701:1976 – Mezinárodní označování ozubených kol. Značky geometrických veličin.
- ISO 1122-1:1983 – Názvosloví ozubených kol: 1. část. Definice geometrie.
- ISO 1328-1:1995 – Čelní ozubená kol. Soustava přesností ISO. 1. část. Definice a dovolené hodnoty odchylek rovnolehlých boků zubů.
- ISO 1328-2 – Čelní ozubená kola. Soustava přesností ISO. 2. část. Definice a dovolené odchylky odvalu a boční vůle.
- ISO 10063 – Čelní ozubená kola. Boky zubů, vlnitost, drsnost ploch, vzdálenost a rovnoběžnost os, číselné hodnoty. [7]

2. Měřicí metody ozubených kol

K měření ozubených kol se používají různé měřicí metody a různé měřicí přístroje a zařízení, od univerzálních až po velmi přesné a speciální přístroje. V poslední době nastal velmi velký pokrok ve vývoji souřadnicových měřicích strojů.

Výhodou souřadnicových měřicích strojů je jejich univerzálnost, jako je například hodnocení odchylky tvaru.

2.1 Opticko dotyková měřicí technika

Z důvodu své všestrannosti nahradila souřadnicová měřicí technika různé jednoúčelové stroje k měření v průmyslově vyráběných dílců a dosáhla vysokého významu.

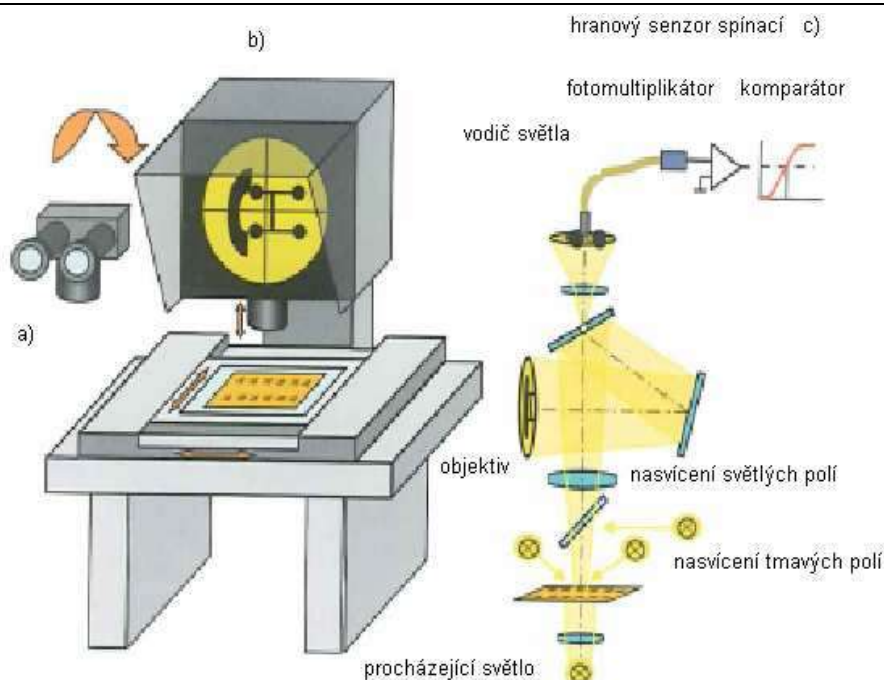
Předpokladem pro moderní optickou souřadnicovou měřicí techniku jsou metody zpracování obrazu a laserové senzory. Tak zvané multisenzorové souřadnicové měřicí stroje jsou vybaveny jak dotykovými, tak optoelektronickými senzory a spojují dotykové a optické měření. Optoelektronové senzory získávají na významu zvláště kvůli vzrůstající komplexnosti tvarů a velikostí dílců a díky rostoucí miniaturizaci. Vysoká rychlost měření multisenzorových souřadnicových měřicích strojů dovoluje hospodárné měření ve výrobě. [8]

2.2 Konstrukce strojů a principy měření

Souřadnicové měřicí stroje slouží k měření geometrických prvků dílců, jako je délka, průměr, úhel, sklon a rovnoběžnost.

Výsledky měření se dají znázornit graficky a v tabulce. Téměř všechna provedení strojů mají za základ kartézský uspořádané souřadnicové osy. Měřicí suport se v osách pohybuje buď ručně, nebo pomocí motoru. Na jedné z os, většinou na svisle ose Z (pinola) je umístěn senzor k snímání měřených bodů.

V 70. letech byl vyvinut tak zvaný „hranový senzor“, první optoelektronický senzor pro měřicí projektoři, který dovoluje automatické snímání bodů objektů. [8]



Obr. 11. Princip konstrukce měřicího mikroskopu a měřicího projektoru s hranovým senzorem Werth a) měřicí mikroskop, b) měřicí projektor, c) hranový senzor [8]

2.3 Souřadnicové měřicí stroje s křížovým stolem

Mechanika této skupiny strojů vznikla z dalšího logického vývoje měřicích mikroskopů a měřicích projektorů.

Tyto přístroje jsou dnes převážně automatizované ve všech třech osách. Rozsah měření je asi 200 mm až 400 mm. Větší rozsahy měření nejsou u této konstrukce hospodárné.

Stroje se stolem nejvyšší třídy jsou navíc vybaveny mechanickými snímacími systémy a laserovými senzory a tím jsou to již multisenzorové souřadnicové měřicí stroje. [8]

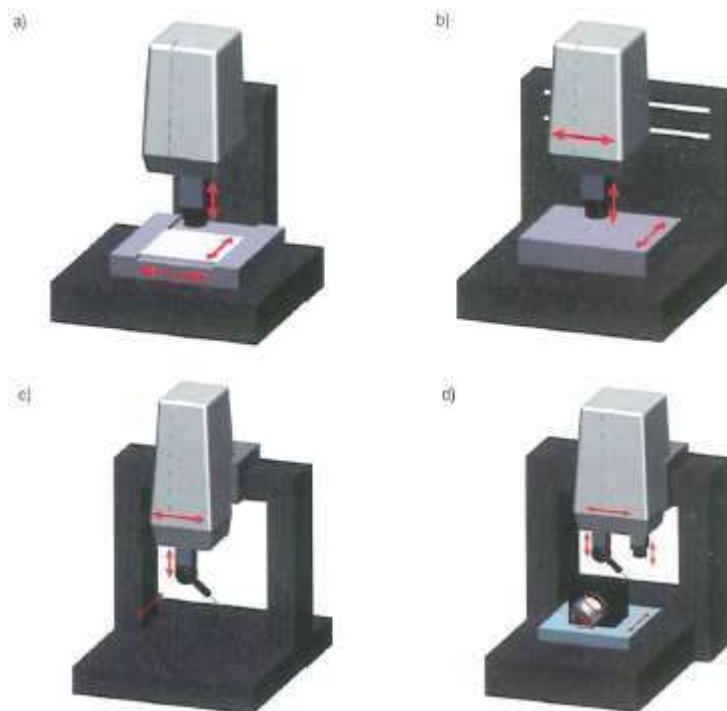
2.4 Souřadnicové měřicí stroje s portálem

Pro vyšší požadavky na přesnost a větší rozsahy měření se nahrazuje mechanické vedení konstrukce stolu systémy se vzduchovými ložisky.

Souřadnicové měřicí stroje s pohyblivým portálem ztělesňují v současnosti nejčastěji realizovaný konstrukční princip větších strojů. Portál se skládá s mostu, který se pohybuje ve směru první osy. Na mostu tzn. ve směru první osy, se pohybuje měřicí suport, na kterém je nainstalována třetí osa (pinola). Protože dílec zůstává během měření v klidu, je možné měřit i velmi těžké dílce. Problematika je instalace vysoce kvalitního osvětlení procházejícím světlem, které je potřebné pro souřadnicové měřicí stroje se zpracováním

obrazu. Proto jsou stroje s pohyblivým portálem vybaveny převážně jen dotykovými senzory.

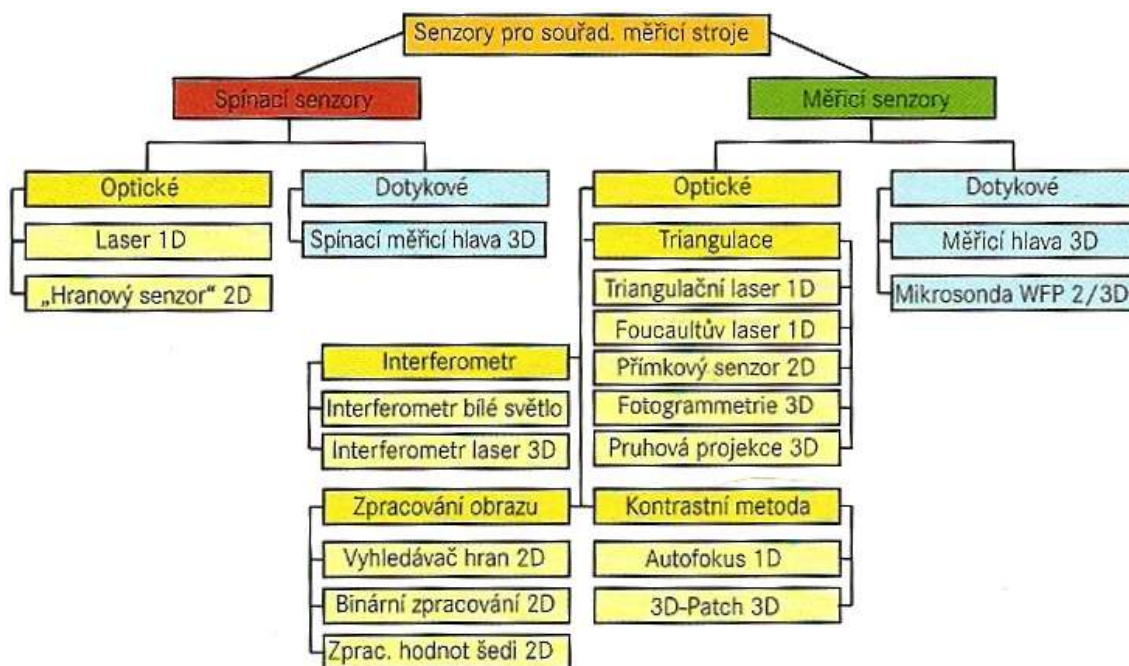
V souřadnicových měřicích strojích s pevným portálem se pohybuje měřeným objektem pomocí pohyblivého stolu ve směru první osy. Otočné a otočně naklápěcí osy dovolují trojrozměrné měření komplexních dílců na jedno upnutí. [8]



*Obr. 12. Konstrukce optických a multisenzorových souřadnicových měřicích strojů:
a)stroj s křížovým stolem b)stroj se stolem konstrukce L c)portálový stroj s pohyblivým portálem d)portálový stroj s pevným portálem, dvě pinoly pro vybavení více senzory a otočně naklápěcí jednotka pro optické měření 3D geometrických prvků[8]*

2.5 Senzory pro souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje mohou být vybaveny spínacími a měřicími senzory. Souřadnicové měřicí stroje mohou být vybaveny spínacími a měřicími senzory. Spínací senzory poskytují při snímání měřeného objektu pouze spouštěcí signál. Ten způsobí, že si přečtou systémy měřicí dráhu a určí se souřadnice. Ke zjištění souřadnic některého bodu objektu je bezpodmínečně nutný pohyb ve směru os – dynamický princip měření. [8]



Obr. 13. Senzory pro souřadnicové měřicí stroje[8]

Na optický senzor se přenáší informace o poloze měřeného bodu pomocí světla – z toho lze stanovit příslušné souřadnice.

U dotykových senzorů se tato informace tvoří dotykem měřeného objektu se snímacím prvkem, většinou se snímací koulí. [8]

2.5.1 Vizuální senzory

Pod pojmem vizuální senzor se rozumí všechny senzory, které mají za základ alespoň dvourozměrné zobrazení měřeného objektu. Senzor zachytí vyhodnotí rozdělení intenzity tohoto optického obrazu.

Výsledky měření závisí proto zásadně na obsluze a jsou srovnatelné jen podmíněně. [8]

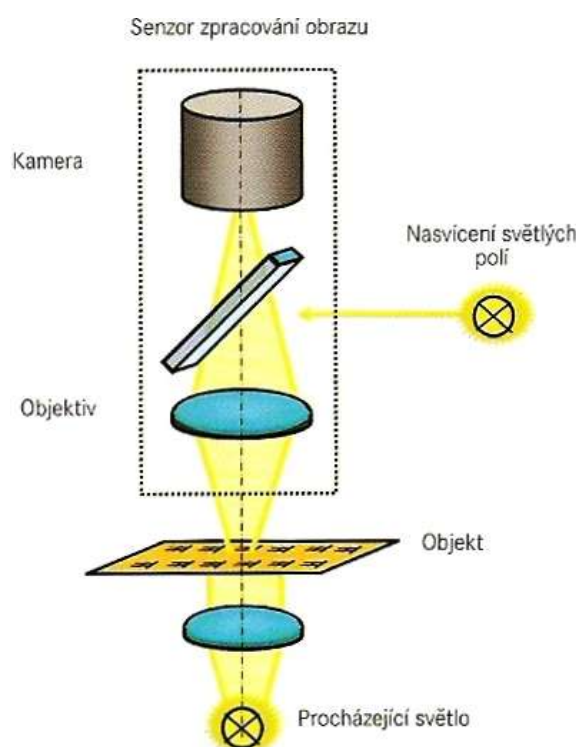
2.5.2 Hranový senzor

Hranový senzor je spínací senzor pro měřicí projektory. Tenké skleněné vlákno zachycuje světelný signál v dráze paprsků projektorů a vede jej na fotomultiplikátor.

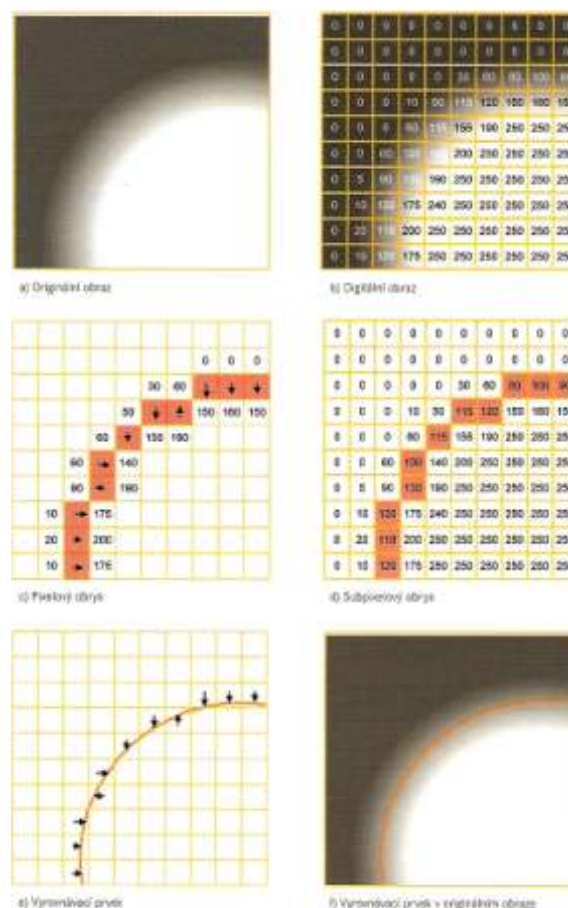
Nízké kontrasty, jaké se většinou vyskytují v dopadajícím světle, mohou vést k chybám měření, jelikož bodový senzor nepřipouští téměř vůbec strategie k rozlišení mezi znečištěním, povrchovými vadami a skutečnými snímanými geometrickými prvky. [8]

2.5.3 Senzor na zpracování obrazu

Jako vizuální senzor se dnes typicky používá senzor zpracování obrazu (*Obr. 14*). Měřený objekt se přes objektiv zobrazí na maticové kameře. Elektronika kamery převede optické signály na digitální obraz, který se použije k výpočtu měřených bodů na vyhodnocovacím počítači s odpovídajícím softwarem pro zpracování obrazu. [8]



Obr. 14 Princip konstrukce senzoru zpracování obrazu s osvětlením procházejícím a dopadajícím světlem[8]



Obr. 15. Postup zpracování obrazu[8]

2.5.4 Senzor měřící vzdálenost

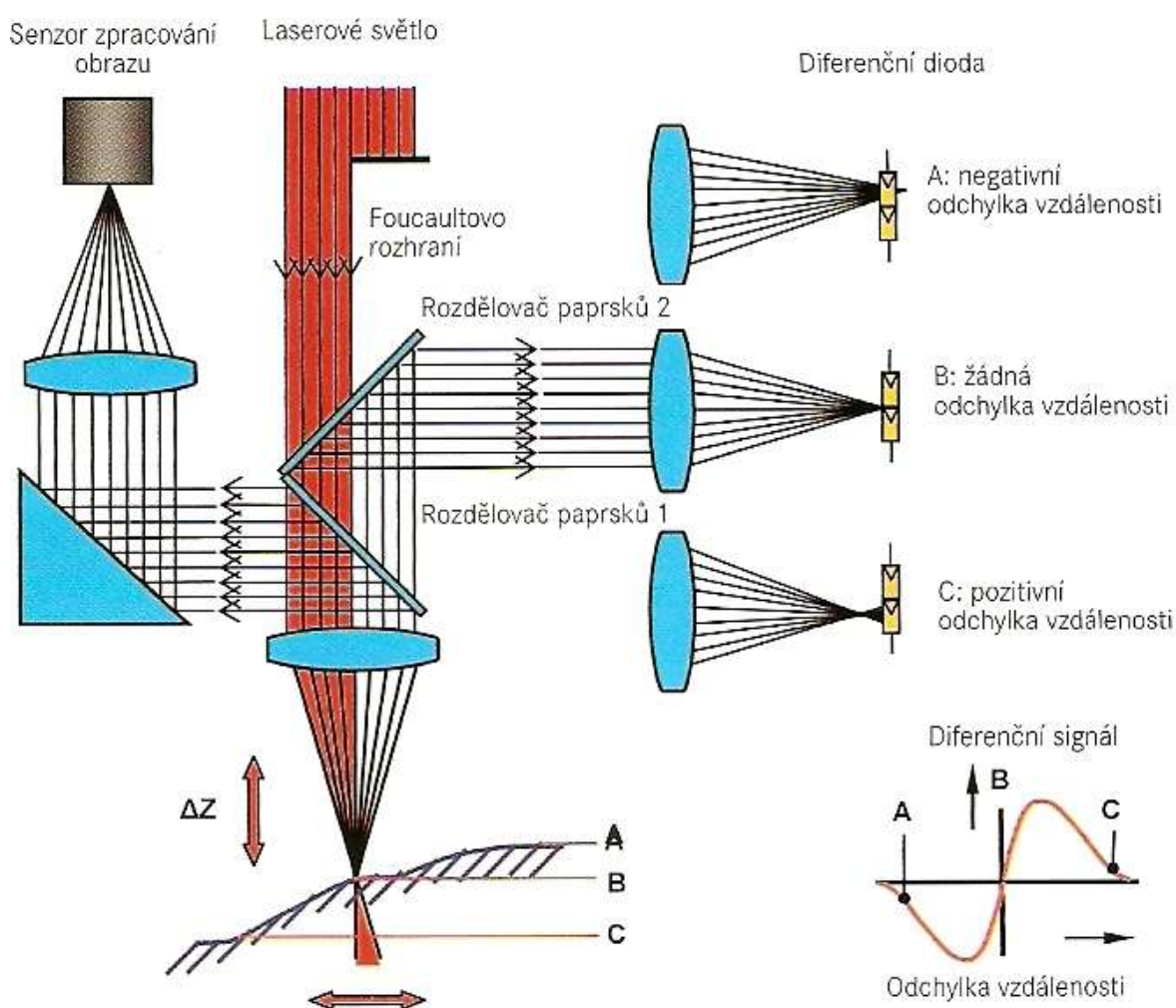
Všemi předchozími senzory lze provádět měření jen v rovinách. Tím je možné jen měření dvourozměrných objektů (2D). Při trojrozměrném měření je však potřebná doplňková metoda k měření ve třetí souřadnici. Senzory měřící vzdálenost zjišťují vzdálenost mezi senzorem a povrchem měřeného objektu. [8]

2.5.5 Laserové bodové senzory

Princip měření laserového bodového senzoru spočívá v tom, že se na měřený objekt promítá světelný paprsek vytvořený laserem. Odrážející se světlá skvrna se zobrazí na optoelektronickém senzoru. Vhodným postupem se odvodí poloha měřeného bodu.

Triangulační senzory, často používané v automatizační technice, fungují podle následujícího principu: laserový paprsek a osa zobrazovací optiky senzoru svírají úhel několik desítek stupňů. Tak se vytvoří mezi laserovým vysílačem, měřeným bodem a senzorem trojúhelník, z něhož se dá zjistit hledaná vzdálenost pomocí vztahů mezi úhly (triangulace)

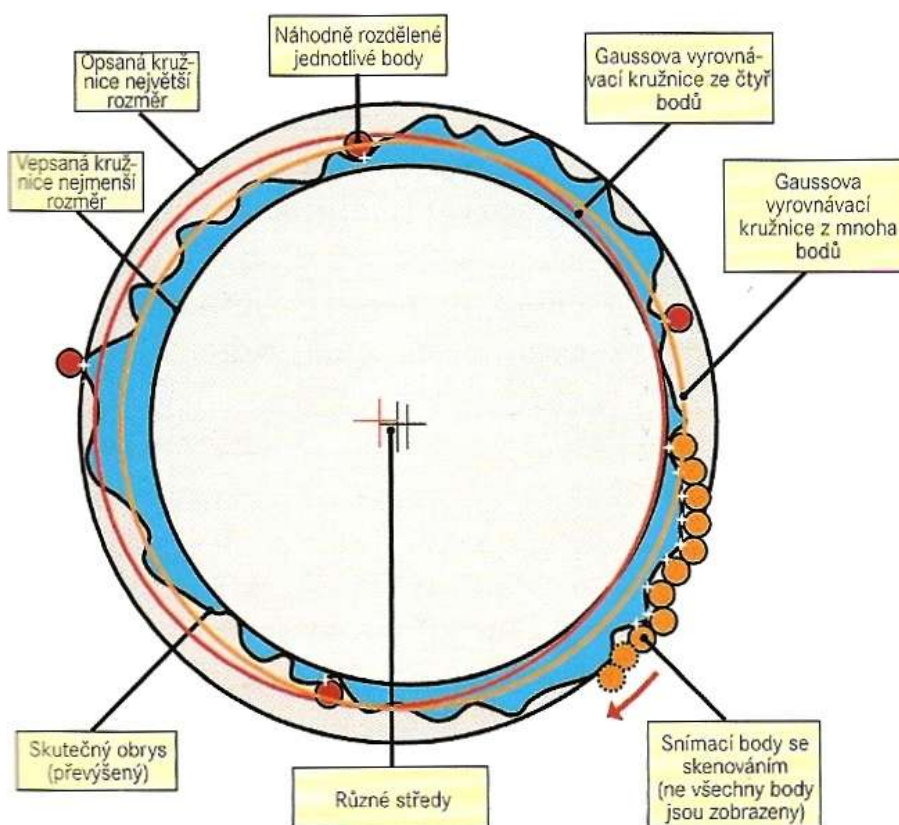
Laserové senzory fungující na Foucaultově principu. Na objektu se poté zobrazí Foucaultovo rozhraní, které se nalézá v dráze paprsků. [8]



Obr. 16 Laserový senzor na Foucaultovu principu s integrovaným senzorem zpracování obrazu[8]

2.5.6 Dotykové senzory

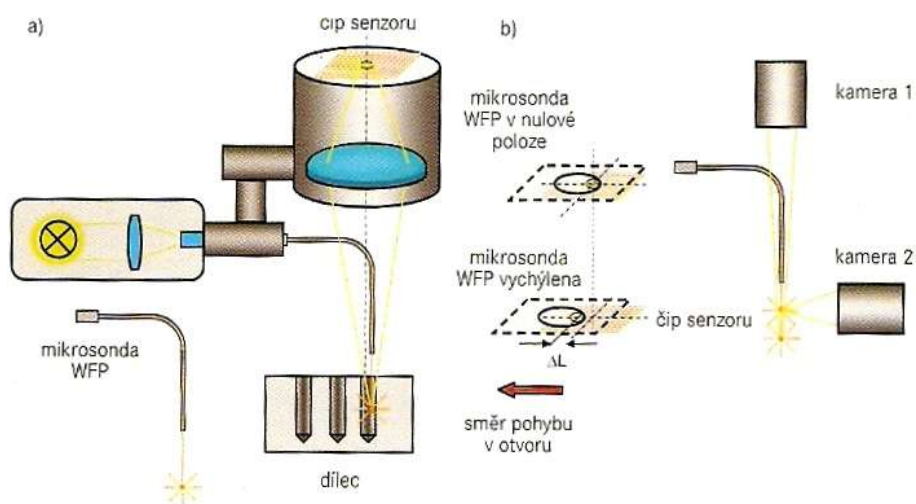
Princip měření spočívá v mechanickém dotyku měřeného objektu. Výsledek měření obsahuje geometrii snímací koule i polohu v prostoru a geometrický tvar měřeného povrchu objektu. U skenování dotykem se musí poloha snímaného bodu určit pomocí matematické korekce ze souřadnic středu snímací koule. [8]



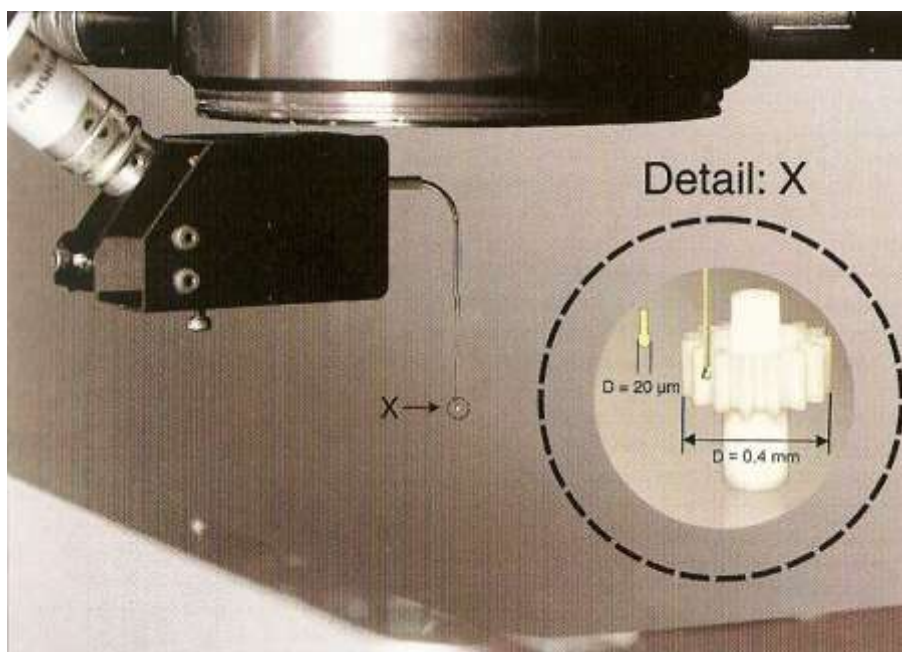
Obr. 17. Vliv počtu měřených bodů na výsledek měření. Málo měřených bodů vede k nesprávné vyrovnávací kružnici[8]

2.5.7. Měřicí dotykově optický senzor

Vlastní měření polohy probíhá senzorem zpracování obrazu.



Obr. 18. Princip funkce mikrosondy a) uspořádání měření 2D b) uspořádání měření 3D [8]



Obr. 19. Mikrosonda WFP s upevněním magnetem při měření mikroskopického ozubeného kola [8]

2.6 Přesnost měřících zařízení a měření

Přesnost měřícího přístroje je vlastnost, která charakterizuje schopnost měřícího přístroje dávat údaje totožné se skutečnou hodnotou veličiny. Vyjadřuje kvalitativní stupeň přiblížení skutečných hodnot k hodnotám požadovaným.

Správnost měřidla je vlastnost měřidla, které charakterizuje schopnost měřidla poskytovat údaje, které se rovnají skutečné hodnotě měřené veličiny, systematické chyby se rovnají nule [2]. Abychom zabezpečili správnou činnost měřícího přístroje musíme si vytvořit vhodné podmínky, které ovlivňují měření. Patří sem:

- teplota,
- osvětlení,
- záchvěvy, otřesy,
- prašnost, tlak, vlhkost vzduchu.

Tyto vlivy se zohledňují v nejistotě měření, když se jich nepodařilo eliminovat vhodným uspořádáním měření. Časový průběh měřeného postupu v tomto případě není rozhodující. V zájmu přesností a jistoty výsledku měření možno měření podle potřeby několikrát opakovat. Pro některé důležité měření jsou stanovené normální základní podmínky. Měřené veličiny jsou definovány při těchto podmínkách a je potřebné jich dodržovat. [1]

2.7 Chyby měření

Měření je důležitým prostředkem v procesu poznání materiálového světa. Jako každé poznání, i výsledek měření dostáváme prostřednictvím smyslů, které schopností se snažíme znásobit pozitím přístrojů.

Smysly, přístroje jsou nedokonalé, rovněž prostředí, ve kterém měříme a měřicí metody nám ovlivňuje naměřenou hodnotu. Naměřená hodnota se skutečné hodnotě jen více, nebo méně přibližuje. Rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou nám určuje vliv podmínek měření a nazývá se **absolutní chybou měření**.

$$\varepsilon = x_n - x_s \quad (\text{mm}) \quad (2.1)$$

ε – absolutní chyba měření,

x_n – naměřená hodnota,

x_s – skutečná hodnota.

Vznik chyby při měření je způsobený skutečnými podmínkami měření.

Celkovou chybu určíme podle vlivu jednotlivých faktorů, které se zúčastňují procesu měření a způsobují to, že mezi naměřenou hodnotou a skutečnou hodnotou vzniká rozdíl - chyba. Hlavní příčiny vzniku chyb jsou:

- měřidlo,
- měřicí metoda,
- prostředí, ve kterém se měření realizuje,
- osoba, která měření uskutečňuje a vyhodnocuje. [1]

Cílem měření nesmí být jen naměřená hodnota, ale i určení chyby (nepřesnosti) měření. Celkovou chybu měření můžeme rozdělit na:

- chyby systematické (Δ)
- chyby náhodné (ε)

$$\xi = \Delta + \varepsilon \quad (2.2)$$

2.7.1 Systematické chyby

Systematické chyby se vyskytují při daném způsobu měření sestavy. Pravidelnost jejich výskytu umožňuje zjistit jejich velikost pokusem nebo výpočtem, v některých případech i odhadem a naměřené hodnoty opravit o systematickou chybu. Výsledná systematická chyba se určí jako součet jednotlivých chyb, způsobených jednotlivými systematickými vlivy, které jsou:

1. Osobní systematické chyby zapříčiněné pozorovatelem uskutečňující měření.

Osobní systematické chyby jsou způsobeny:

- nevědomosti,
- neopatrnosti, nepozornosti, které jsou úměrné charakterovým vlastnostem člověka,
- nedokonalosti lidských smyslů, využívaných v procese měření.

2. Chyby měřicího přístroje vznikají nedokonalostí přístroje. Způsobují je výrobní tolerance, nepřesnost výroby jednotlivých funkčních elementů, chyby při montáži, nastavování apod. Třeba brát do úvahy i deformaci, tření mezi jednotlivými součástkami přístroje a setrvačnými účinky pohybujících se částí.

3. Chyby metody měření vznikají nedokonalostí a neúplností způsobenou měřením, nevhodnou volbou metody, nesprávnou polohou přístroje vzhledem na měřenou součástku, nesprávnou přitlačnou silou přístroje na měřenou součástku apod.
4. Chyby způsobné vlivem prostředí, ve kterém se měření uskutečňuje. [3]

Systematické chyby se snažíme odstranit následujícím způsobem:

- odstranění příčin, které vyvolávají,
- vhodnou kompenzací,
- uplatnění příslušných korekcí,
- kombinací uvedených třech způsobu.

2.7.2 Náhodné chyby

Náhodné chyby jsou způsobené příčinami náhodného charakteru, co do velikosti i směru působení. Náhodné chyby se vyskytují při každém jednotlivém měření a ovlivňují každou naměřenou hodnotu. Opakovaným měřením, za stejných podmínek (osoba, měřidlo, metoda, prostředí apod.) bude z toho důvodu soubor naměřených hodnot vykazovat rozptyl.

2.7.3 Hrubé chyby

Při řadě naměřených hodnot se stává, že některé z naměřených hodnot se zjevně odlišují od ostatních. Hovoříme o nich, že jsou zatížené hrubými chybami.[2]

Hrubé chyby jsou chyby způsobené pozorovatelem, měřidlem, měřicím procesem, měřenou metodou, prostředím, nesprávným zápisem naměřených hodnot, způsobem zpracování naměřených hodnot, nejčastější chybou je na měřicím přístroji apod.

Hrubým chybám je potřebné věnovat zvýšenou pozornost a vylučují naměřené hodnoty nebo výsledek měření zatížených touto chybou ze souboru naměřených hodnot, přesto je nepoužitelný. Hrubou chybu často ani nezařazujeme mezi částkové složky celkové chyby. V měření se nesmí pokračovat, pokud nebude příčina vzniku chyb odstraněna. [3]

2.8 Nejistota měření

Nejistota měření je parametr, který charakterizuje rozsah hodnot okolo výsledku měření a zaručuje s určitou pravděpodobností, že v tomto intervalu bude ležet skutečná hodnota měřené veličiny. V nejistotě měření jsou zahrnuté všechny jednotlivé náhodné chyby a nejistoty určující systematické chyby. Nahrazuje kvalitu na vyšší úroveň chyby měření. [3]

Velikost nejistoty se vyjadřuje jako směrodatná odchylka nebo její násobek. Směrodatná odchylka se v tomto případě označuje jako standardní nejistota a má rovněž rozměr jako měřená veličina. [1]

Nejistota výsledku měření závisí od mnohých faktorů, ze kterých nejvýznamnější jsou druh a hodnota měřené veličiny, použité metody, prostředky a podmínky měření a schopnosti osob vykonávající měření.

Vstupní zdroje nejistoty měření je možné rozdělit do dvou skupin na základě metodiky určování jednotlivých nejistot. Rozlišujeme metodiku hodnocení standardních nejistot typu A a typu B.

Při nezávislých naměřených hodnotách (x_1, x_2, \dots, x_n) je **standardní nejistota typu A** vázaná na aritmetický průměr a určí se výpočtem podle vztahu na výpočet výběrové směrodatné odchylky:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} = \frac{S_{(X)}}{\sqrt{n}} \quad (\mu\text{m}) \quad (2.3)$$

Metodika určující **standardní nejistoty typu B** – se skládají z následujících bodů:

- vytipují se možné zdroje těchto nejistot,
- určení standardních nejistot každého zdroje – převzetím z dokumentace tabulek, normy..., odhadem; podle níže uvedených způsobů,
- posouzení závislostí mezi jednotlivými zdroji – určení korelačního koeficientu,
- určení výsledné nejistoty typu B = u_B .

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \cdot u_{Bj} \right)^2} \quad (\mu\text{m}) \quad (2.4)$$

Kombinovaná standardní nejistota:

Uvedená nejistota měření se stanovuje jako geometrický součet nejistot typu A (u_A) a typu B (u_B). [5]

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (\mu\text{m}) \quad (2.5)$$

Rozšířená standardní nejistota:

Uvedená nejistota měření definuje interval okolo výsledku měření, ve kterém se s určitou pravděpodobností nachází výsledek měření. Stanovuje se jako součin standardní nejistoty měření u a koeficientu rozšíření k

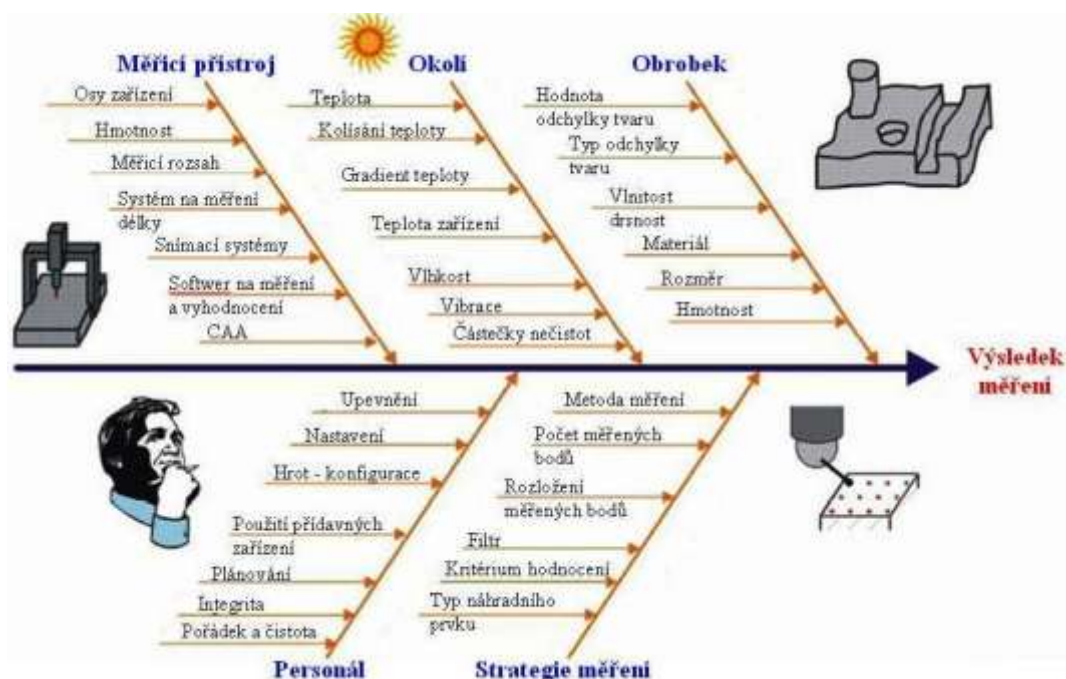
$$U = k \cdot u \quad (2.6)$$

Pro normální rozdělení se koeficient rozšíření k volí z intervalu $\langle 2, 3 \rangle$. Když $k = 2$ úroveň spolehlivosti je 95%, když $k = 3$ úroveň spolehlivosti je 99,7%.

2.9 Vliv na přesnost měření

Vlivy přispívající k nejistotě měření můžeme rozdělit do těchto hlavních skupin znázorněné na obr.14.:

- prostředí měření,
- měřený objekt,
- měřicí zařízení,
- měřicí obsluha, vhodná strategie měření.



Obr. 20. Faktory ovlivňující výsledky měření [4]

2.9.1 Vliv prostředí

Hlavní složkou je vliv teploty a její kolísání – u SMS stanovuje ideální teplotu okolí výrobce, ideální teplota je $20\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$. Dalšími složkami vlivu prostředí jsou prašnost, tlak a vlhkost vzduchů a chvění.

2.9.2 Vliv měřeného objektu

Vliv obrobku se nedá všeobecnět, přestože do značné míry závisí od způsobu obrábění (např. při soustružení ve sklíčidle vykazuje obrobek jiné odchylky tvaru jako při broušení mezi hroty) a od materiálu, ze kterého je vyrobený. [4]

Hlavní vlivy měřeného objektu s ohledem na gravitační sílu a měřené síly sondy jsou:

- charakteristika povrchu,
- tvrdost,
- elastická popřípadě i plastická pružnost.

2.9.3 Vliv měřicího zařízení

Každé měřicí zařízení obsahuje svoje vlastní vnitřní nedokonalosti, které se berou do úvahy při udávání přesnosti konkrétního měřicího zařízení, jakou jsou:

- nepřesnost výroby jednotlivých funkčních elementů,
- nepřesnost montáže převodových systému a mechanismu,
- deformace.

Tyto negativní vlivy se eliminují ověřováním a kalibrací měřicích zařízení. U SMS je podle DIN EN ISO 10360 každá specifikace přesnosti označena jako Maximum Permissible Error (MPE). Uvádí mezní hodnotu, která nesmí být překročena měřicí odchylkou při stanovení měřicí úlohy.

3. Kontaktní skenery

Kontaktní 3D skenery snímají objekt skrze fyzický kontakt. Nejužívanějším systémem jsou souřadnicové měřicí stroje, které jsou ponejvíce využívány ve výrobních závodech a jsou vysoce přesné. Nevýhodou je však nezbytný kontakt se skenovaným objektem což znemožňuje skenování malých nebo měkkých součástí. Také jsou tyto systémy v porovnání s optickými skenery velmi pomalé, tedy ty nejrychlejší CMM dokážou snímat při kopírování snímacím hrotem, jež je montován na ramenu stroje s frekvencí několika stovek hertzů, avšak optický systém jako je triangulační laserový skener dokáže pracovat od 10 až k 500 kHz. [9]



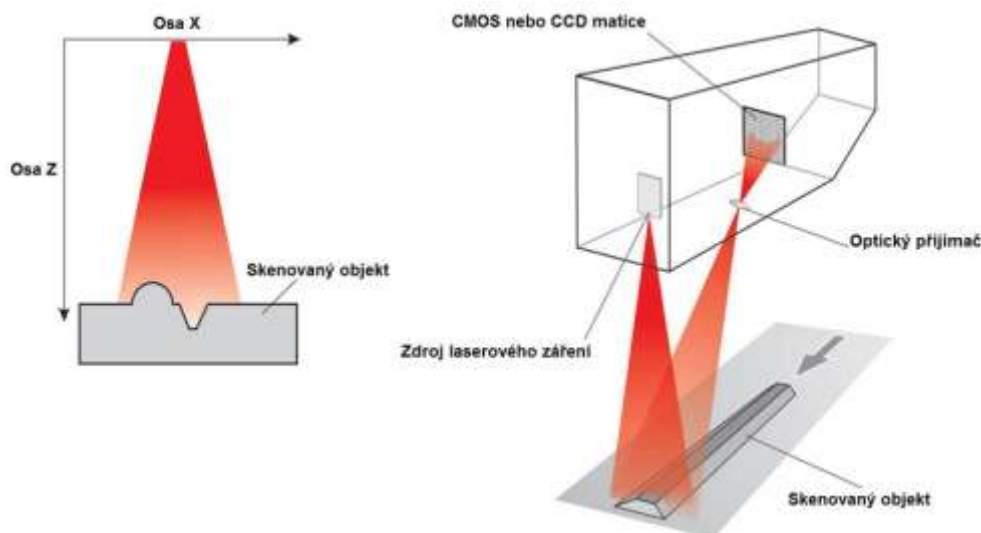
Obr. 21. Kontaktní skenovací snímač Renishaw REVO[9]

4. Bezkontaktní skenery

Do skupiny bezkontaktních skenerů lze zahrnout jakýkoliv snímač, jenž k digitalizaci objektu zájmu nevyžaduje kontakt s jeho povrchem. Je celá řada bezkontaktních metod, které se v hojné míře využívají, ovšem nejčastěji se setkáváme s triangulačními skenery. Mezi další možnosti patří fotogrammetrie, time-of-flight 3D laserové skenery nebo počítačová tomografie. [9]

4.1 Triangulační princip

Triangulační 3D laserové skenery jsou aktivními skenery, jež používají laserového záření ke snímání okolí. Ve srovnání s time-of-flight 3D laserovým skenerem svítí triangulační laser na objekt zájmu a využívá kamery pro sledování oblasti s laserovým bodem. V závislosti na tom jak daleko laser dopadá na povrch skenovaného objektu, je laserový bod zobrazován na čipu kamery v rozdílných místech. Tato technika je nazývána triangulační jelikož laserový bod, kamera a laserový zářič tvoří trojúhelníkový tvar. Délka jedné strany trojúhelníku, která je tvořena kamerou a laserovým zářičem je známá a taktéž je znám úhel laserového zářiče. Úhel kamery lze určit dohledáním polohy laserového bodu v zorném poli kamery. Tyto tři části poskytují zcela komplexní informace pro dopočítání tvaru a velikosti trojúhelníku a poskytnou polohu laserového bodu.



Obr. 22. Schéma triangulačního laserového skeneru [9]

4.2 3D laserové skenery time-of-flight

Aktivní time-of-flight 3D laserové skenery, které využívají světla laseru pro sejmутí objektu. Podstatou tohoto typu skeneru je time-of-flight laserový dálkoměr. Tedy laserový dálkoměr nalezne vzdálenost povrchu pomocí měření oběhu dráhy za dobu letu světla. Laser se používá k vyzařování pulzního světla a měří se doba, než se odražené světlo zobrazí na detektoru. [9]

4.3 Fotogrametrie

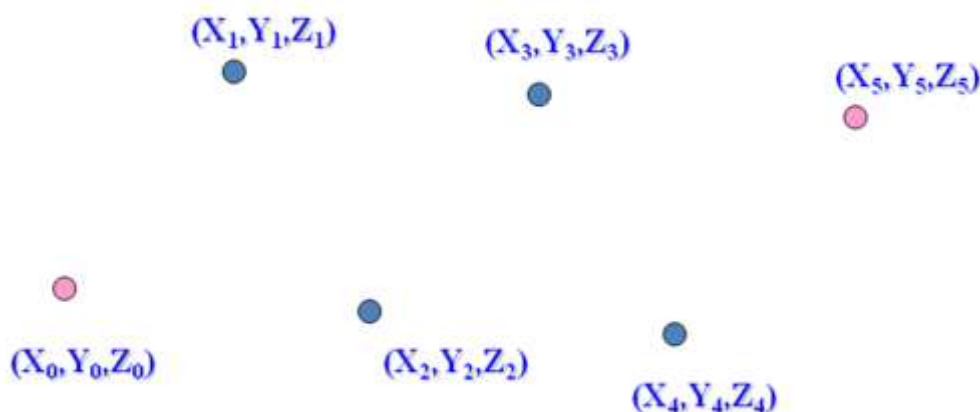
Fotogrametrie umožňuje rekonstrukci objektů z fotografie. Moderní fotogrametrie se dělí na pozemní a leteckou. Samotný princip fotogrametrie spočívá v tom, že na objekt zájmu jsou umístěny přesné kalibrační značky, kdy každá má unikátní kódování. Objekt zájmu je fotografován z několika pozic a na výsledných snímcích jsou kalibrační značky identifikovány a spárovány. V případě letecké fotogrametrie není využíváno kalibračních značek, ale identifikují se stejné objekty a ty se taktéž párují s leteckými snímky pro vytvoření topologického obrazu. [9]

4.4 Výstupní data 3D skenování

4.4.1 Sít' bodů

Předpokládejme, že skenuji plochu, skener zachytí na povrchu mnoho jednotlivých bodů. Každý jednotlivý bod je popsán souřadnicemi X, Y, Z . Tato množina bodů je označována jako sít' bodů. Soubory sítě bodů mají nejčastěji příponu ASC, XYZ a obsahují pouze informace o souřadnicích jednotlivých bodů.

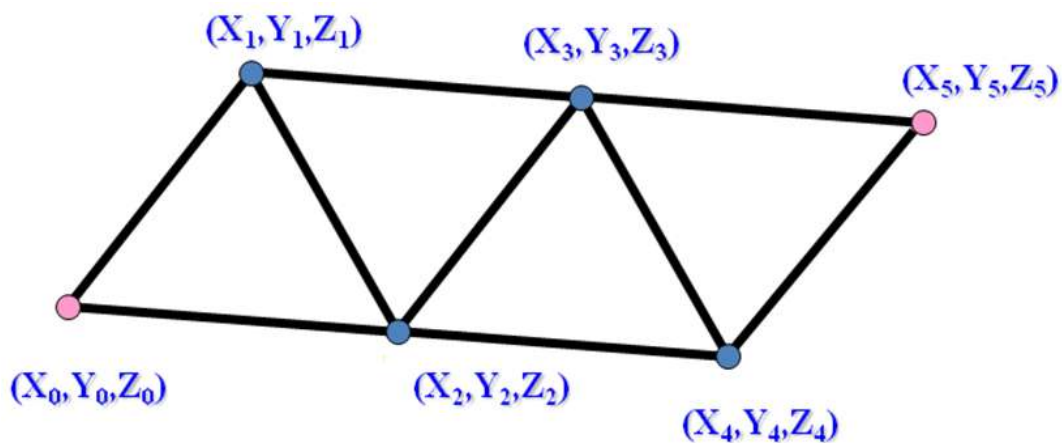
Čím je hustota bodů vyšší, tím je vykreslení objektu věrnější. Tento datový soubor je základem pro vytvoření polygonální sítě propojením sousedních bodů přímkami, které společně tvoří trojúhelníkové oblasti. [9]



Obr. 23. Sít' bodů [9]

4.4.2 Mesh

Jestliže využijeme existující síť bodů a propojíme sousední body přímkami, je tak vytvořeno velké množství malých ploch. Stejně jako síť bodů je tato polygonální struktura dat velmi hustá a dříve byla velmi obtížná práce s těmito daty v mnoha CAD/CAM programech.



Obr. 24. Polygonální síť [9]

5. Experimentální část

K měření bylo použito čelní ozubené kolo s přímými zuby, které bylo nalisováno na hřídeli. Měření bylo provedeno jak na optických přístrojích, tak i na přístrojích měřících dotykovou metodou. Měření oběma metodami nám umožní jejich vzájemné srovnání. Měření proběhlo ve firmě SUNGWOO HITECH s. r. o. v Žilině, na Žilinské univerzitě v Žilině – Strojnická fakulta a ve firmě PRIMA BILAVČÍK s. r. o. v Uherském Brodě.

5.1 Měřené ozubené kolo



Obr. 25. Měřené čelní ozubené kolo s přímými zuby

5.1.1 Naměřené parametry ozubeného kola

Počet zubů	$z = 30$
Průměr hlavové kružnice	$d_a = 80 \text{ mm}$
Šířka ozubení	$b = 25 \text{ mm}$
Úhel záběrů	$\alpha = 20^\circ$

5.1.2 Výpočet zbývajících parametru ozubeného kola

Modul:
$$m = \frac{D_a}{z + 2} = \frac{80 \text{ mm}}{30 + 2} = \underline{\underline{2,5}} \quad (5.1)$$

$$\text{Roztečná kružnice: } D = m \cdot z = 2,5 \cdot 30 = \underline{\underline{75 \text{ mm}}} \quad (5.2)$$

$$\text{Patní kružnice: } D_f = D - 2 \cdot (1,25 \cdot m) = 75 \text{ mm} - 2 \cdot (1,25 \cdot 2,5) = \underline{\underline{68,75 \text{ mm}}} \quad (5.3)$$

$$\text{Základní kružnice: } D_b = D - \cos \alpha = 75 \text{ mm} - \cos 20^\circ = \underline{\underline{70,476 \text{ mm}}} \quad (5.4)$$

5.2 Měření součástky na přenosném optickém souřadnicovém měřicím stroji ACTIRIS 350

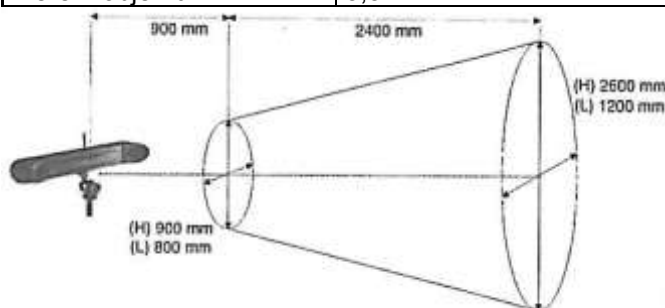
Měření se uskutečnilo ve firmě SUNGWOO HITECH s.r.o. v Žilině. Proběhlo na vysoce výkonném, přenosném a optickém souřadnicovém měřicím stroji ACTIRIS 350. Patří do skupiny tzv. HANDYSCAN 3D. Má velké uplatnění v průmyslu automobilovém a leteckém. Byl použit dotykový snímač s \varnothing dotyku 3 mm o přesnosti 0,0001 mm. Získané výsledky byly vyhodnoceny v softwaru Delcam PowerINSPECT 2010.

Přenosný souřadnicový měřicí stroj má vlastnosti:

- Neomezený rozsah měření až 6 m.
- Nízká citlivost na změny teploty.
- Rychlá instalace kdekoli na lehkém uhlíkovém stativu.
- Současně sledovat a zaznamenávat pozice až na 50 bodů v reálném čase.

Tab.1. Parametry souřadnicového měřicího stroje

Charakteristika	Hodnoty
Přesnost (ISO 10360-2)	
<i>Jednotlivý bod</i>	$\pm 15 \text{ cm na } 2 \sigma$
<i>Objemová</i>	$\pm 75 \text{ cm na } 2 \sigma$
Opakovatelnost	$\pm 25 \text{ cm na } 2 \sigma$
Pořizovací rychlost	15 měření/sec max
Měření objemu	3,5 m ³



Tab.2. Vlastnosti měřicího stroje

Optika a video	
Senzor	Vysoce rozlišený CCD snímač
Kontrast	Automatický řízené
Doba expozice	Automatický řízené
Objektiv	Kompaktní, vysoce kvalitní, optimální nastavení při výrobě
Osvětlení	
Typ	Vysoká účinnost blízko IR LED osvětlení
Klasifikace	Klasifikace podle normy IEC 60825-1
Mechanické vlastnosti	
Hmotnost	4,5 kg
Rozměry	941 x 193 x 124 (bez antény)
Výška antény	85 do 170 mm v závislosti na zemi
Elektrické napájení	
Elektrické napájení měřicí hlavy	22 až 27 Vdc (24 Vdc jmenovitý 0,8 A) Používejte pouze originální napájecí zdroj
Balení externího napájení	Primární: 100 Vac 50-60 Hz 1,2 A Sekundární: 24 Vdc 2,5 A Hmotnost: 250 g Rozměry: 135 x 80 x 44 mm



Obr. 26. Souřadnicový měřicí stroj ACTIRIS 350



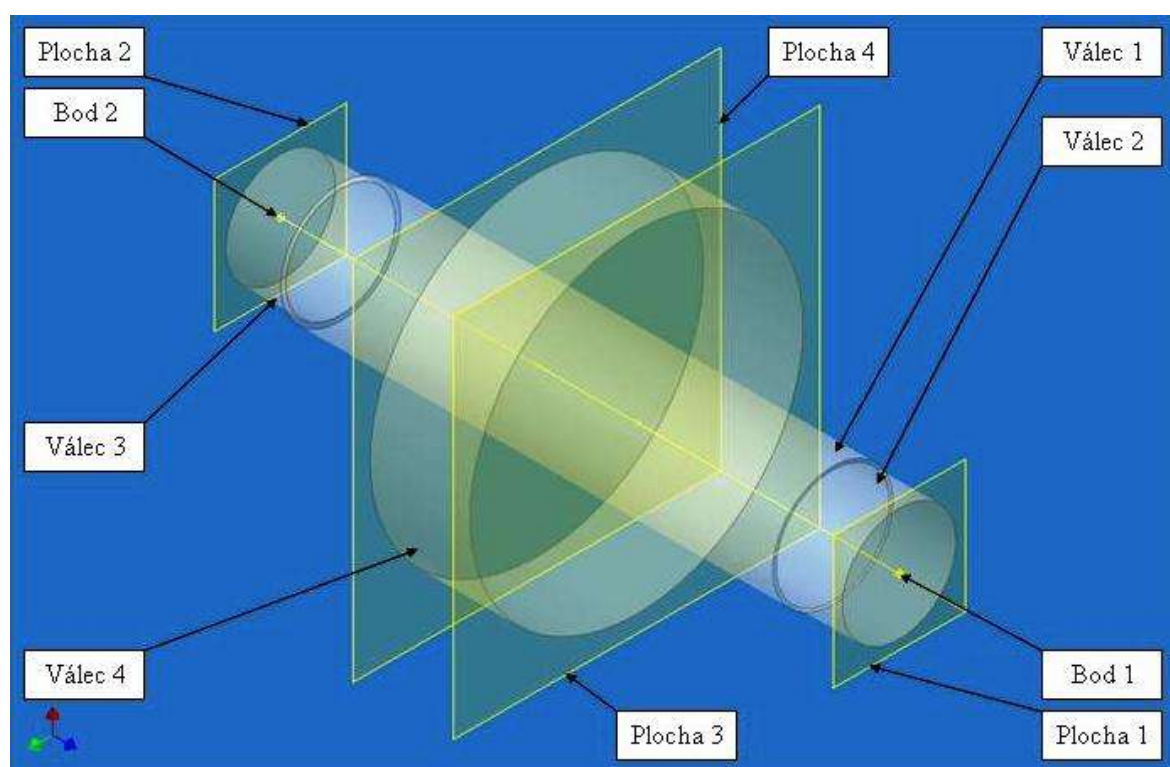
Obr. 27. Snímání hodnot na ACTIRIS 350



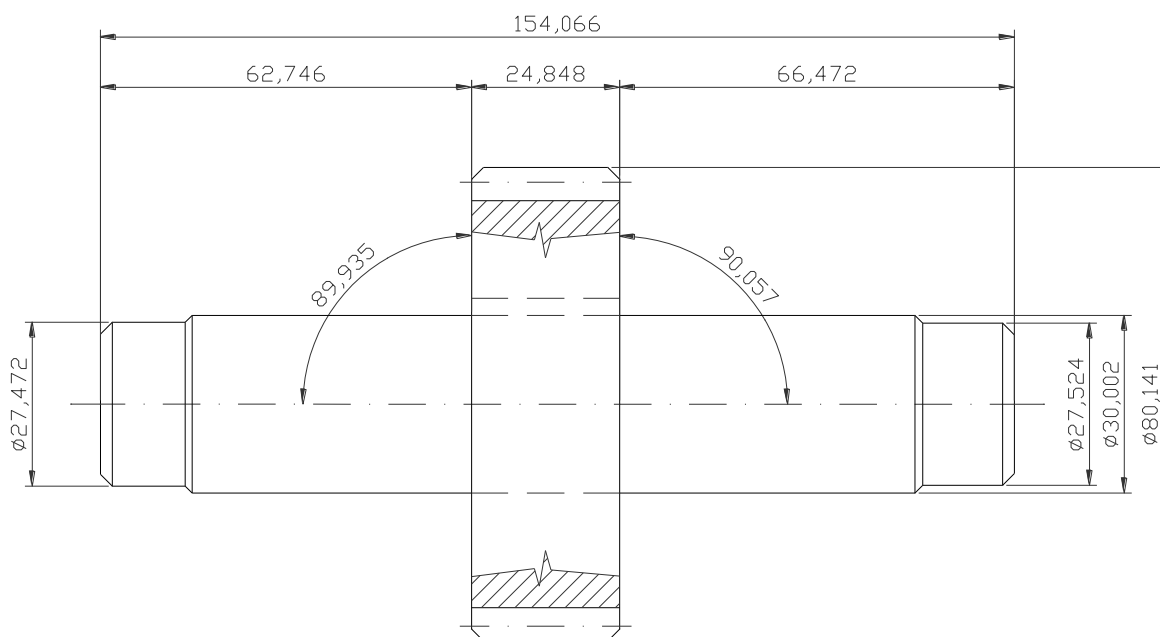
Obr. 28. Opticko-dotykový snímač



Obr. 29. Dotyk s $\varnothing 3$ mm



Obr. 30. Získané plochy a body při měření



Obr. 31. Získané parametry součástí

Protokol z měření viz. Příloha č.1.

5.3 Měření součástky na multisenzorovém souřadnicovém měřícím stroji Werth – VideoCheck IP 250 3D CNC

Měření součástky proběhlo na multisenzorovém souřadnicovém měřícím stroji Werth – VideoCheck IP 250 3D CNC na Žilinské univerzitě v Žilině na strojní fakultě. Měřena součást byla měřena dvěma způsoby a to dotykovou rubínovou sondou o \varnothing hrotu 1 mm a s předložením 20 mm, tak také byla měřena optikou. Dotykovým způsobem byla naměřena evolventa ozubení. Ostatní parametry hřídele byly naměřeny optikou.

Ústředním rysem přístrojové řady Werth – VideoCheck je volně stavitelná pracovní vzdálenost zoom v rozsahu 20 – 220 mm. Série přístrojů splňuje veškeré požadavky na vysokou přesnost. Světově ojedinělá, pnutí prosta konstrukce měřicího stolu, dokáže zajistit takové úrovně přesností, která není jiným způsobem dosažitelná u srovnatelných stolních modelů. (10)



Obr. 32. Měřicí přístroj Werth – VideoCheck IP 250

Obr. 33. Měřicí dotyková sonda
Renishaw MIP

Podmínky měření a parametry měřicího stroje Werth – VideoCheck IP 250 3D CNC

Teplota prostředí:	20°C
Vlhkost prostředí:	55%
Průměr měřicího hrotu:	1 mm
Předložení hrotu	20 mm
Rozsah stroje:	X = 250 mm
	Y = 125 mm
	Z = 200 mm
Přesnost stroje:	(2,5 + L/150) cm
	Dle norem ISO 10360 resp. VDI/VDE 2617
Dotyková sonda	Renishaw MIP

5.3.1 Měření dotykovou sondou Renishaw MIP

Měření dotykem a vyhodnocení celkové odchylky profilů bylo provedeno v programu WinWerth ve kterém je definována evolventa takto:

- D – průměr základní kružnice,
- Ohi – úhel základní kružnice,
- FT – odchylka tvaru.

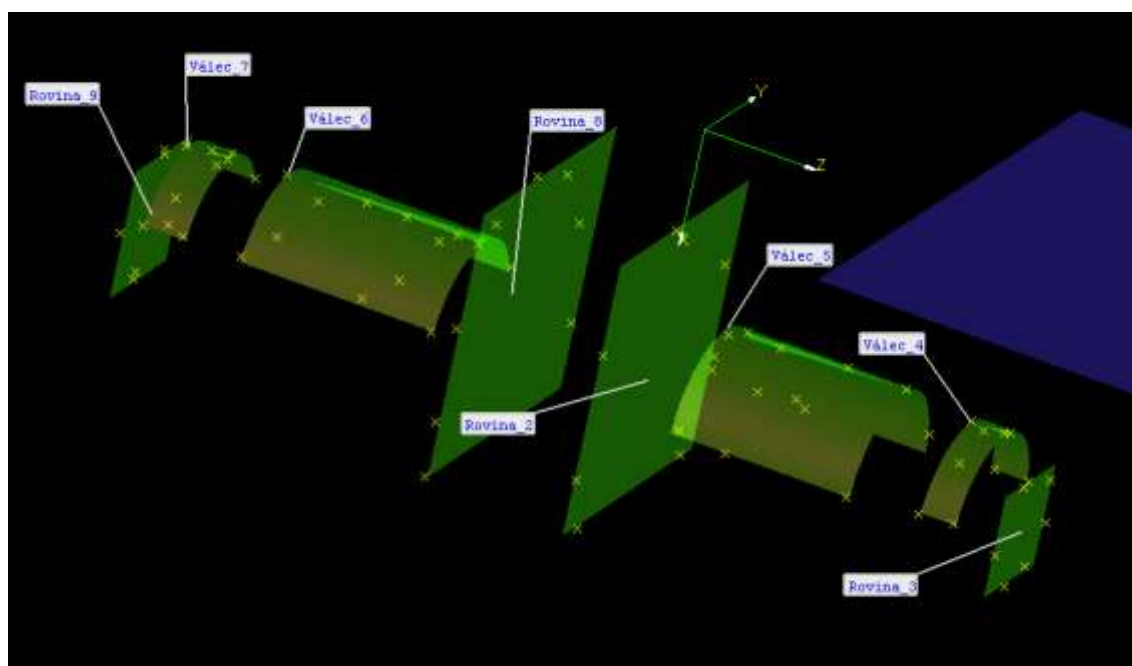
Měření proběhlo na každém pátém zubě ozubeného kola.

Tab.3. Naměřených hodnot celkové odchyšky profilu

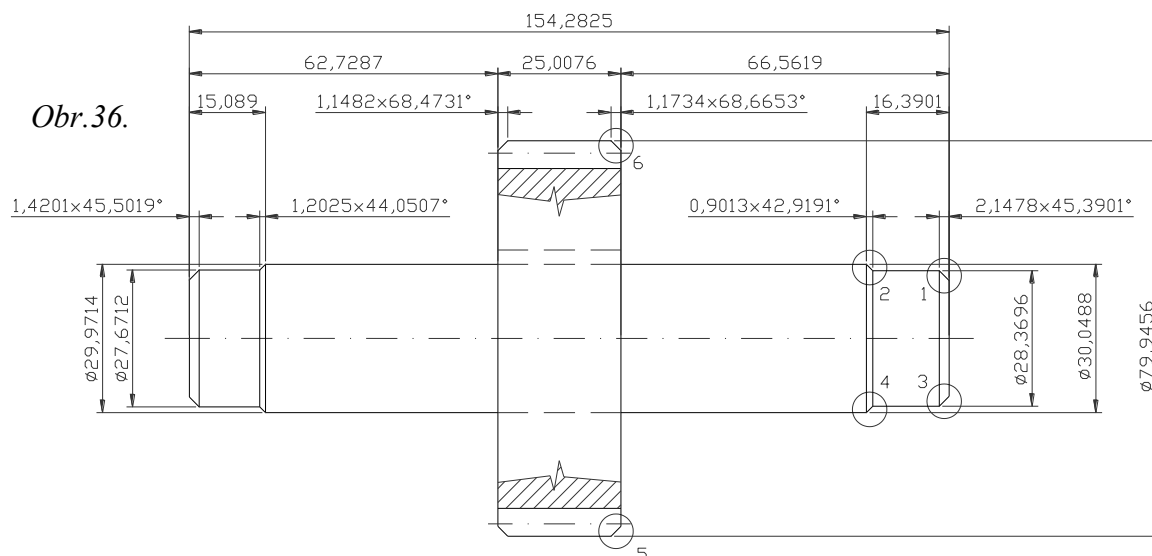
Zub	d_b	D	FT
5	70,476	70,5971	0,0125
10		70,4786	0,0078
15		70,9528	0,0018
20		70,4228	0,0068
25		69,9972	0,0036
30		70,0371	0,0101

5.3.2 Měření bezkontaktní metodou

Při měření optikou nelze provést měření ozubení tak byly změřeny ostatní parametry součásti. Jakož jsou průměry hřídele, průměr hlavové kružnice ozubeného kola, délka hřídele, tloušťka ozubeného kola a jejich zkosení.



Obr. 35. Získané roviny a válce při měření optikou



Získané rozměry při měření optikou

V kroužcích jsou označené místa zaznamenaných kontur zkosení a naměřenými úhly zkosení, které jsou přiložené v příloze č.2..

5.4. Měření součástky na multisenzorovém souřadnicovém měřicím stroji Werth – Inspector FQ a stereoSCAN 3D – BREUCKMANN

Měření ozubeného kola bylo provedeno ve firmě PRIMA BILAVČÍK s.r.o. v Uherském Brodě. Ozubené kolo bylo měřeno dvěma způsoby. A to zaprvé způsobem kontaktním na multisenzorovém měřicím stroji Werth – Inspector FQ a zadruhé optickým 3D skenováním na zařízení stereoSCAN 3D – BREUCKMANN. Měření probíhalo v klimatizované laboratoři za teploty prostředí 20°C a vlhkostí 50-60%.

5.4.1 Kontaktní měření na multisenzorovém měřicím stroji Werth – Inspector FQ

Měření bylo provedeno na multisenzorovém měřicím stroji Werth – Inspector FQ. Za pomoci rubínového dotyku o Ø 2 mm s tvrdokovovou stopkou délky 80 mm, uchycenou v kontaktní sondě SP 600 RENISHAW.

Před samotným měřením musela být provedena kalibrace referenčního dotyku tak i měřícího dotyku z důvodu výměny stopky. Kalibrace proběhla za pomoci kalibrační

koule o \varnothing 25 mm a kalibračního kroužku o \varnothing 40 mm. První kalibrace zajistila vzájemný posun optiky a referenčního dotyku a druhá kalibrace zajistila polohu referenčního dotyku a měřicího dotyku. Protokoly o kalibraci viz. Příloha č.3..



*Obr.37. Multisenzorový měřicí stroj
Werth – Inspector FQ*



*Obr.38. Kalibrace za pomoci kalibračního
kroužku*

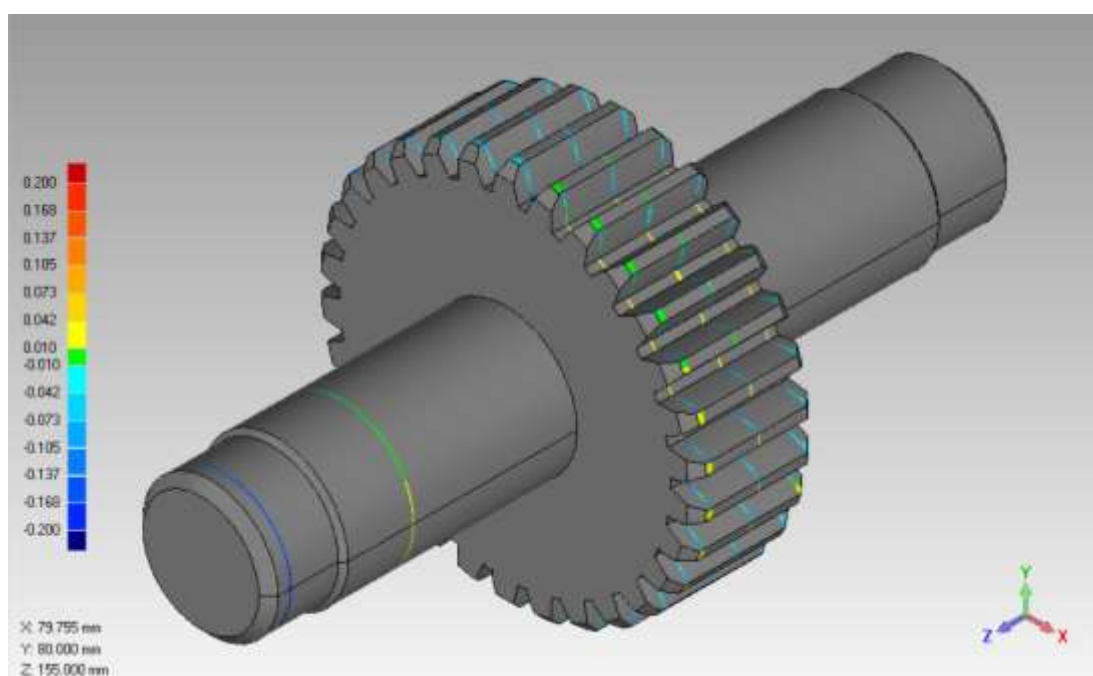
Technické parametry stroje:

Rozsah:	X = 400 – 800 mm
	Y = 400 – 400 mm
	Z = 200 – 400 mm
Max. možná chyba:	E1: $(2,5+L/120)$ cm
	E2: $(2,9+L/100)$ cm
	E3: $(4,5+L/75)$ cm
Rychlost:	$v_{\max} = 1$ m/s
Akcelerace:	$a_{\max} = 1$ g
Měřicí frekvence:	5 Hz

Měření bylo provedeno ve třech řezech ozubeného kola a vyhodnocené bylo pomocí softwaru Geomagic Qualify 12.



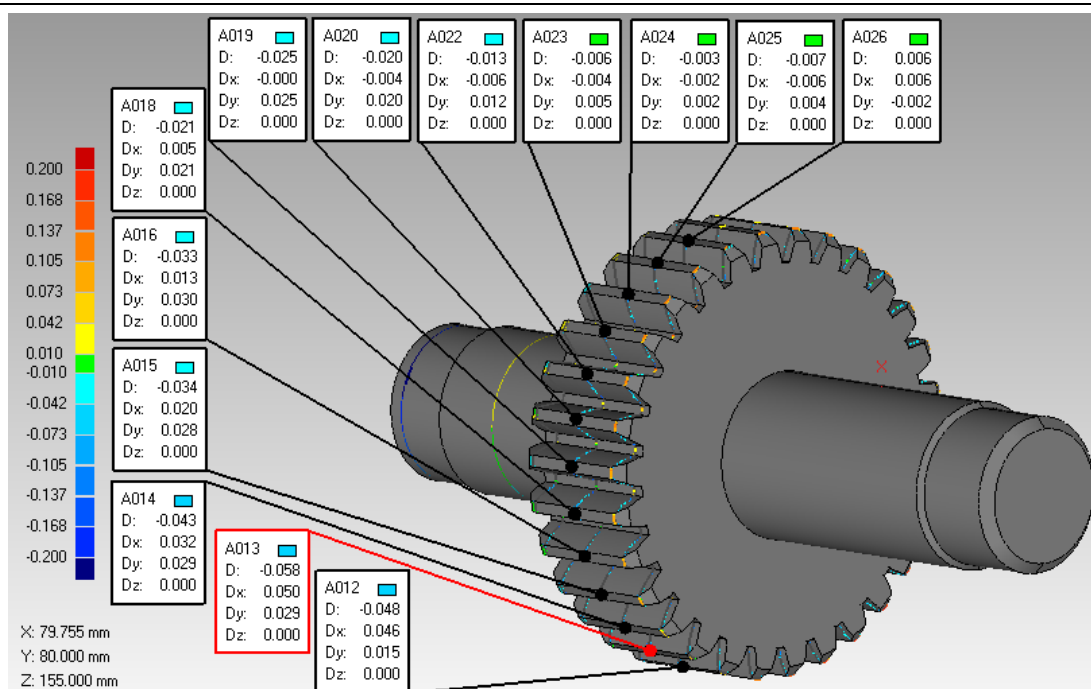
Obr. 39. Měření profilu ozubeného kola



Obr.40. Spárované ASC data s CAD daty

Vyhodnocení ozubeného kola bylo pomocí softwaru Geomagic Qualify 12. Importoval jsem aktuálních data formátu ASC a také nominálních CAD Dat. Nastavil jsem data ASC jako testovaná data a srovnáním metodou BestFit (tzn. metoda nejmenších čtverců) jsem porovnal aktuální data s nominálními daty. Podle barev poznáme velikost odchylky.

Na *Obr. 40.* jsou spárovány ASC data ozubeného kola s CAD modelem ozubeného kola. Poté byly postupně získávány odchylky obvodového házení v řezech na hlavové a patní kružnici za pomoci příkazu Create Annotations a zpracovány do tabulek a grafů.



Obr. 41. Postupné získávání odchylek

5.4.1.1 Měření obvodového házení na hlavové a patní kružnici

1. řez na hlavové kružnici

Tab.4. Tabulka naměřených hodnot v 1. řezu [mm]

zubová mezera	Odchylka h_a	zubová mezera	Odchylka h_a	zubová mezera	Odchylka h_a
1	-0,020	11	-0,070	21	-0,038
2	-0,034	12	-0,047	22	0,003
3	-0,054	13	-0,069	23	-0,004
4	-0,039	14	-0,016	24	-0,008
5	-0,039	15	-0,030	25	-0,007
6	-0,050	16	0,000	26	-0,005
7	-0,060	17	-0,047	27	0,003
8	-0,063	18	0,004	28	-0,003
9	-0,054	19	-0,007	29	-0,001
10	-0,060	20	0,004	30	-0,006



Obr. 42. Diagram obvodového radiálního házení na hlavové kružnici v 1. řezu

Odchylka označená červenou barvou je maximální a označena modrou barvou je minimální.

Výpočet odchylky obvodového radiálního házení na hlavové kružnici F_{r1}

$$F_{r1} = |F_{r\max}| + |F_{r\min}|$$

$$F_{r1} = |0,004 \text{ mm}| + |0,070 \text{ mm}| = \underline{\underline{0,074 \text{ mm}}} \quad (5.6)$$

2. řez na hlavové kružnici

Tab.5. Tabulka naměřených hodnot v 2. řezu [mm]

zubová mezera	Odchylka h_a	zubová mezera	Odchylka h_a	zubová mezera	Odchylka h_a
1	-0,026	11	-0,048	21	-0,003
2	-0,034	12	-0,058	22	-0,007
3	-0,034	13	-0,043	23	0,006
4	-0,035	14	-0,034	24	-0,007
5	-0,022	15	-0,033	25	-0,001
6	-0,049	16	-0,021	26	-0,006
7	-0,047	17	-0,025	27	-0,007
8	-0,058	18	-0,020	28	-0,014
9	-0,057	19	-0,013	29	-0,017
10	-0,056	20	-0,006	30	-0,023



Obr. 43. Diagram obvodového radiálního házení na hlavové kružnici v 2. řezu

Odchylka označená červenou barvou je maximální a označena modrou barvou je minimální.

Výpočet odchylky obvodového radiálního házení na hlavové kružnici F_{r2}

$$F_{r2} = |F_{r\max}| + |F_{r\min}|$$

$$F_{r2} = |0,006 \text{ mm}| + |0,058 \text{ mm}| = \underline{\underline{0,064 \text{ mm}}} \quad (5.7)$$

3. řez na hlavové kružnici

Tab.6. Tabulka naměřených hodnot v 3. řezu [mm]

zubová mezera	Odchylka h_a	zubová mezera	Odchylka h_a	zubová mezera	Odchylka h_a
1	-0,011	11	-0,019	21	0,000
2	-0,020	12	-0,014	22	0,006
3	-0,006	13	-0,018	23	-0,004
4	-0,005	14	-0,010	24	0,007
5	0,008	15	0,000	25	0,005
6	0,007	16	0,009	26	-0,007
7	0,010	17	0,010	27	0,002
8	0,004	18	-0,009	28	0,006
9	0,007	19	-0,001	29	-0,004
10	0,009	20	0,001	30	-0,009



Obr. 44. Diagram obvodového radiálního házení na hlavové kružnici v 3. řezu

Odchylka označená červenou barvou je maximální a označena modrou barvou je minimální.

Výpočet odchylky obvodového radiálního házení na hlavové kružnici F_{r3}

$$F_{r3} = |F_{r\max}| + |F_{r\min}|$$

$$F_{r3} = |0,010 \text{ mm}| + |0,020 \text{ mm}| = \underline{\underline{0,030 \text{ mm}}} \quad (5.8)$$

1. řez na patní kružnici

Tab.7. Tabulka naměřených hodnot v 1. řezu [mm]

zubová mezera	Odchylka h_f	zubová mezera	Odchylka h_f	zubová mezera	Odchylka h_f
1	0,008	11	-0,021	21	0,008
2	0,006	12	-0,021	22	0,017
3	0,001	13	-0,007	23	0,042
4	0,006	14	-0,004	24	0,043
5	0,013	15	0,004	25	0,047
6	-0,005	16	-0,004	26	0,069
7	-0,009	17	0,003	27	0,049
8	-0,015	18	0,013	28	0,037
9	-0,022	19	-0,006	29	0,029
10	-0,019	20	0,019	30	0,044



Obr. 45. Diagram obvodového radiálního házení na patní kružnici v 1. řezu

Odchylka označená červenou barvou je maximální a označena modrou barvou je minimální.

Výpočet odchylky obvodového radiálního házení na patní kružnici F_{r1}

$$F_{r1} = |F_{r\max}| + |F_{r\min}|$$

$$F_{r1} = |0,069 \text{ mm}| + |0,022 \text{ mm}| = \underline{\underline{0,091 \text{ mm}}} \quad (5.9)$$

2. řez na patní kružnici

Tab.8. Tabulka naměřených hodnot v 2. řezu [mm]

zubová mezera	Odchylka h_f	zubová mezera	Odchylka h_f	zubová mezera	Odchylka h_f
1	0,026	11	0,010	21	0,021
2	0,023	12	0,001	22	0,032
3	0,036	13	0,016	23	0,022
4	0,019	14	0,017	24	0,033
5	0,006	15	0,013	25	0,040
6	0,002	16	0,007	26	0,053
7	-0,007	17	0,010	27	0,024
8	0,006	18	0,009	28	0,029
9	0,009	19	0,014	29	0,029
10	-0,005	20	0,013	30	0,029



Obr. 46. Diagram obvodového radiálního házení na patní kružnici v 2. řezu

Odchylka označená červenou barvou je maximální a označena modrou barvou je minimální.

Výpočet odchylky obvodového radiálního házení na patní kružnici F_{r2}

$$F_{r2} = |F_{r\max}| + |F_{r\min}|$$

$$F_{r2} = |0,053 \text{ mm}| + |0,022 \text{ mm}| = \underline{\underline{0,060 \text{ mm}}} \quad (5.10)$$

3. řez na patní kružnici

Tab. 9. Tabulka naměřených hodnot v 3. řezu [mm]

zubová mezera	Odchylka h_f	zubová mezera	Odchylka h_f	zubová mezera	Odchylka h_f
1	0,071	11	0,066	21	0,054
2	0,061	12	0,043	22	0,052
3	0,080	13	0,059	23	0,039
4	0,076	14	0,051	24	0,043
5	0,076	15	0,030	25	0,058
6	0,107	16	0,016	26	0,049
7	0,134	17	0,021	27	0,063
8	0,163	18	0,018	28	0,032
9	0,124	19	0,050	29	0,052
10	0,102	20	0,061	30	0,050



Obr. 47. Diagram obvodového radiálního házení na patní kružnici v 3. řezu

Odchylka označená červenou barvou je maximální a označena modrou barvou je minimální.

Výpočet odchylky obvodového radiálního házení na patní kružnici F_{r3}

$$F_{r3} = |F_{r\max}| + |F_{r\min}|$$

$$F_{r3} = |0,163 \text{ mm}| + |0,016 \text{ mm}| = \underline{\underline{0,179 \text{ mm}}} \quad (5.11)$$

5.4.1.2 Měření celkové odchylky profilů - evolventa

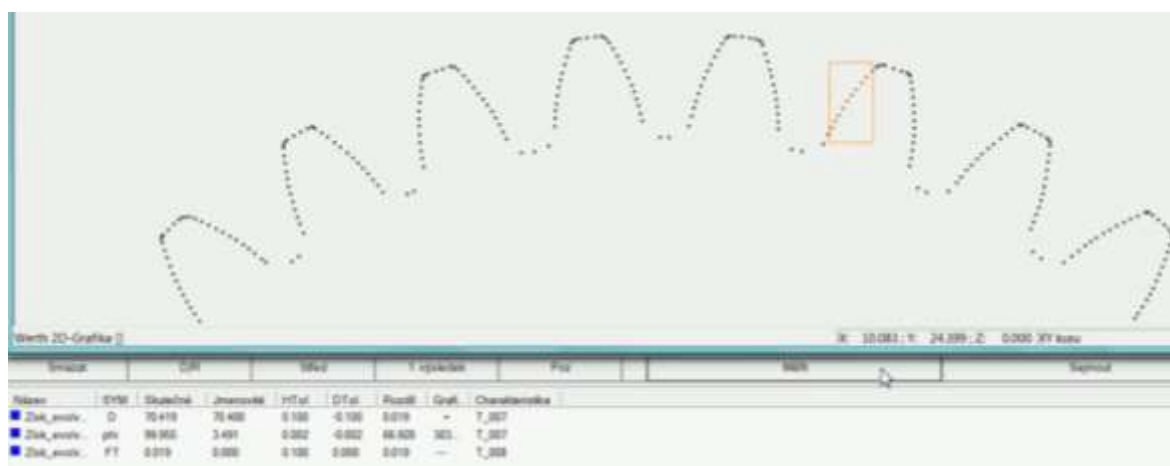
Vyhodnocení celkové odchylky profilů bylo provedeno v programu WinWerth ve kterém je definována evolventa takto:

- D – průměr základní kružnice,
- Ohi – úhel základní kružnice,
- FT – odchylka tvaru.

Měření proběhlo na každém pátém zubě ozubeného kola vždy z pravé a levé strany zubu.

Tab.10. Tabulka naměřených hodnot celkové odchylky profilu [mm]

Zub	d _b	D	FT
5	70,476	70,419	0,019
		70,478	0,027
10		70,399	0,023
		70,370	0,059
15		70,504	0,019
		70,468	0,026
20		70,519	0,021
		70,478	0,017
25		70,539	0,016
		70,409	0,043
30		70,323	0,039
		70,328	0,020



Obr. 48. Získávání hodnot z WinWerth

Grafický záznam celkové odchylky profilu od skutečného tvaru ve všech třech řezech viz příloha č.4.

5.4.2 Optické měření na stereoSCAN 3D – BREUCKMANN

Měření proběhlo na optickým 3D skenovacím zařízení stereoSCAN 3D – BREUCKMANN.

Certifikace podle normy VDI/VDE 2634, se dvěma digitálními kamerami umístěnými asymetricky vůči projektoru zajistí maximální výkon s ohledem na přesnost a flexibilitu.

Dvě digitální CCD kamery, každá o rozlišení 5,0 milionů pixelů, garantuje vysoké rozlišení a přesnost. Struktura na bázi karbonových vláken zabezpečuje optimální mechanickou a termální stabilitu všech senzorů. S ohledem na rychlý čas aktivace dat, která je cca 1 sekunda, jsou redukovány vnější rušivé vlivy na minimum. Kalibraci celého systému s vysokým stupněm přesnosti lze provést v průběhu několika minut.

Vzhledem k asymetrickému nastavení kamer o třech rozličných triangulačních úhlech 10°, 20°, 30°, které jsou implementovány do jednoho systému. Vzhledem ke své konfiguraci poskytuje velmi širokou nabídku zorných polí zahrnuje 6 standardních měřicích polí od 60 mm až k 950 mm.

Před skenováním musela být součást upravená křídovým postřikem 3D Laserscaning – Anti Clore Spray a 3D Laserscaning – Cleaner pro lepší skenování.

Technické parametry stroje:

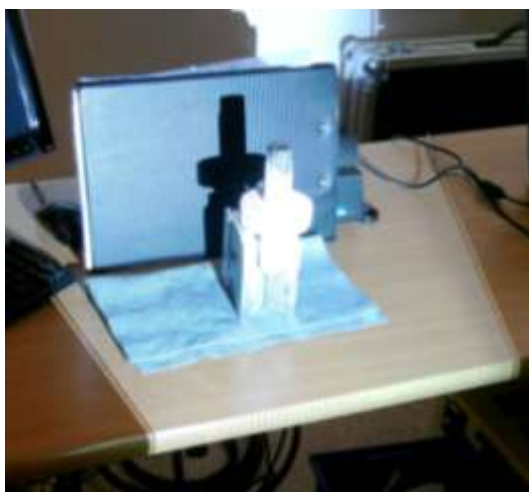
Zdroj světla	120 W / 200 W
Váha senzoru	8 kg
Snímač	2 digitální kamery s vysokým rozlišením
Digitalizace	2448 x 2048 pixelů
Pracovní vzdálenost	880 mm
Limit rozlišení (Z)	2 cm (v závislosti na měřeném rozsahu)
Doba aktivace	< 1 s



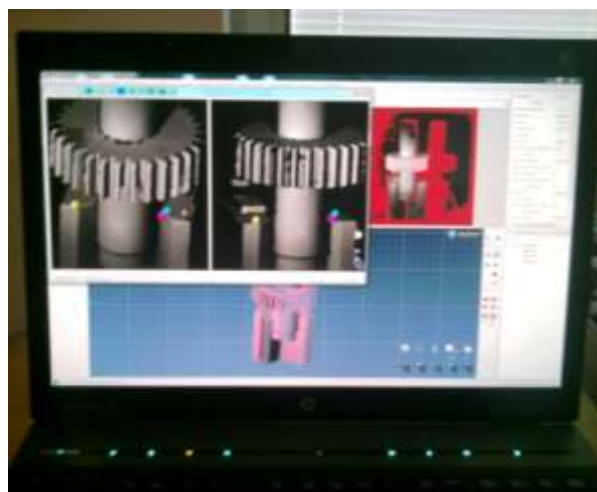
*Obr.49. 3D skener stereoSCAN 3D
– BREUCKMANN*



*Obr.50. Upravený povrch součástí
křídovým nástřikem*

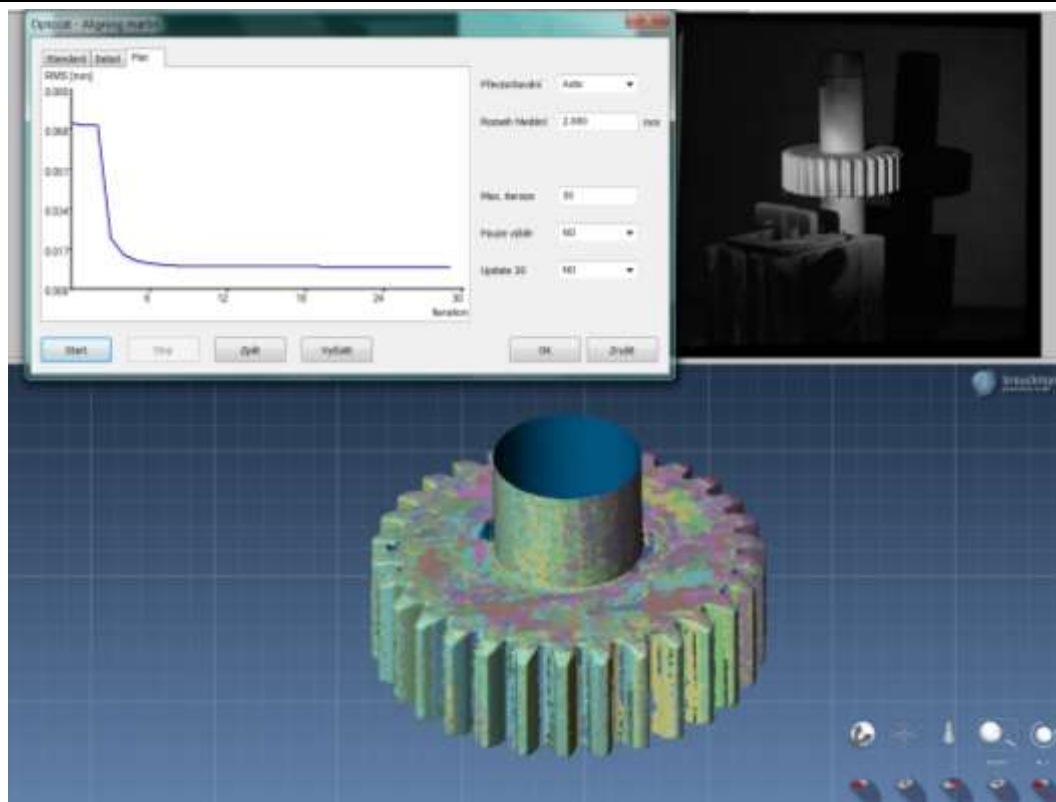


Obr.51. Samotné skenování součásti



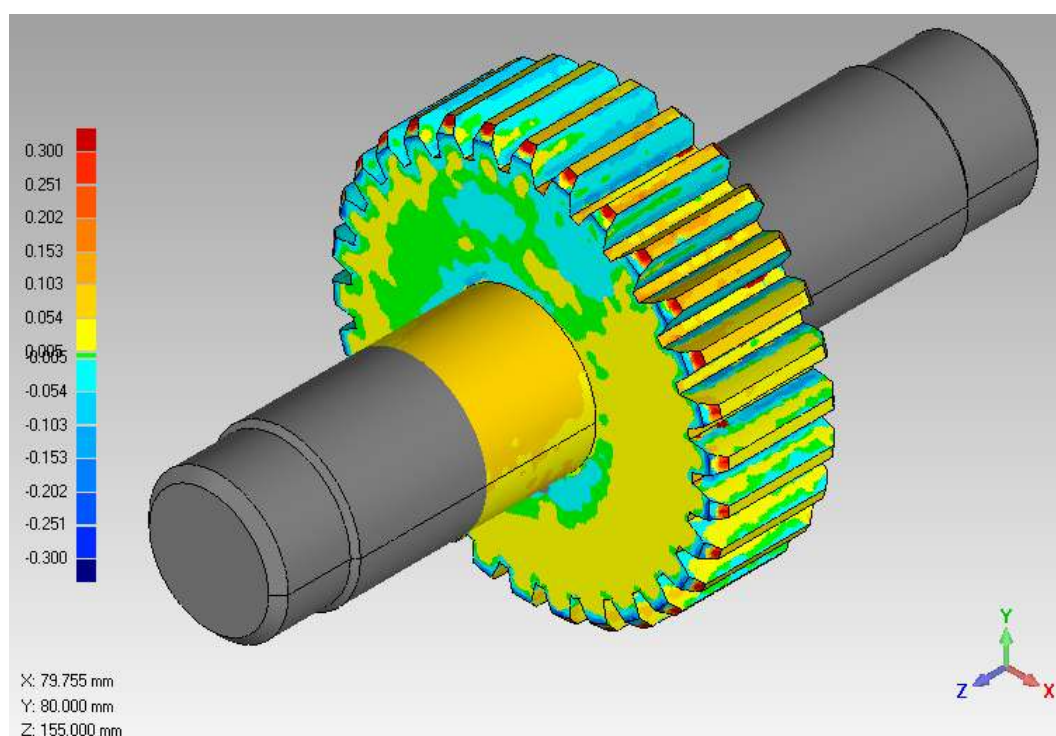
Obr.52. Ruční párování skenů

Postup skenování viz příloha č.5. Po samotném skenování nastane spárování všech skenů do jednoho souboru pomocí metody nejmenších čtverců.



Obr.53. Finální naskenovaná součást

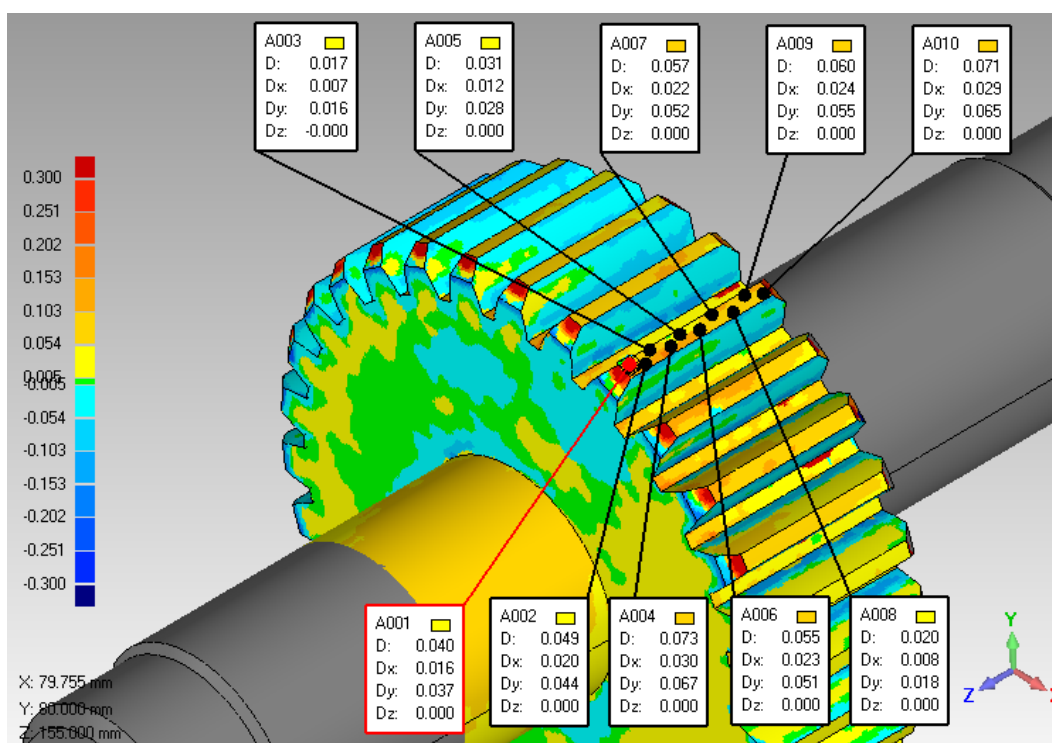
Vyhodnocení ozubeného kola bylo pomocí softwaru Geomagic Qualify 12. Importoval jsem aktuálních data formátu STL a také nominálních CAD Dat. Nastavil jsem STL soubor jako testovaná data a srovnáním metodou BestFit (tzn. metoda nejmenších čtverců) jsem porovnal aktuální data s nominálními daty. Podle barev poznáme velikost odchylky.



Obr.54. Porovnání aktuálních dat s nominálními daty

5.4.2.1 Statistické vyhodnocení odchylky obvodového házení na hlavové kružnici

Po porovnání STL dat s CAD daty pomocí metody Create Annotations jsem zjistil číselnou hodnotu odchylky. Z každého zubů na hlavové kružnici jsem získal 10 hodnot odchylek a ty jsem poté zpracoval statisticky do tabulky a grafu.



Obr.55. Získání hodnot obvodové házivosti hlavové kružnice ozubeného kola

Tab.11. Tabulka naměřených hodnot odchylky hlavové kružnice [mm]

Číslo měření / Zub	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,040	0,047	0,026	-0,004	0,074	0,062	0,036	0,032	0,066	0,075
2	0,049	0,065	0,037	0,056	0,050	0,052	0,041	0,049	0,062	0,060
3	0,017	0,042	0,027	0,028	0,053	0,050	0,037	0,029	0,074	0,061
4	0,073	0,084	0,055	0,055	0,036	0,045	0,039	0,052	0,055	0,063
5	0,031	0,054	0,003	0,045	0,044	0,047	0,045	0,038	0,061	0,071
6	0,055	0,049	0,054	0,051	0,022	0,027	0,045	0,036	0,062	0,069
7	0,057	0,050	0,017	0,043	0,019	0,027	0,045	0,042	0,049	0,063
8	0,020	0,041	0,046	0,045	0,017	0,023	0,033	0,039	0,072	0,077
9	0,060	0,015	0,028	0,020	0,003	0,006	0,035	0,036	0,035	0,071
10	0,070	-0,004	0,025	0,034	0,051	0,020	0,042	0,030	0,055	0,049
Σ	0,472	0,443	0,318	0,373	0,369	0,359	0,398	0,383	0,591	0,659
\bar{x}	0,0472	0,0443	0,0318	0,0373	0,0369	0,0359	0,0398	0,0383	0,0591	0,0659
$S(\bar{x})$	0,0062	0,0077	0,0052	0,0059	0,0068	0,0056	0,0014	0,0024	0,0036	0,0026
Číslo měření / Zub	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,048	0,066	0,065	0,056	0,005	0,078	0,086	0,060	-0,005	0,066
2	0,046	0,055	0,061	0,049	0,059	0,065	0,062	0,057	0,044	0,052
3	0,052	-0,004	0,048	0,042	0,064	0,064	0,046	0,053	0,059	0,046
4	0,057	0,007	0,059	0,043	0,053	0,066	0,046	0,061	0,047	0,046
5	0,061	0,006	0,051	0,047	0,050	0,059	0,043	0,062	0,046	0,042
6	0,056	0,047	0,048	0,046	0,049	0,065	0,054	0,066	0,038	0,044
7	0,053	0,051	0,036	0,044	0,055	0,070	0,059	0,061	0,044	0,039
8	0,047	0,059	0,044	0,054	0,056	0,065	0,062	0,065	0,054	0,043
9	0,037	0,060	0,016	0,044	0,021	0,060	0,049	0,047	0,040	0,048
10	0,045	0,060	0,003	0,048	0,055	0,057	0,063	0,057	0,032	0,044
Σ	0,502	0,407	0,431	0,473	0,467	0,649	0,570	0,589	0,399	0,470
\bar{x}	0,0502	0,0407	0,0431	0,0473	0,0467	0,0649	0,0570	0,0589	0,0399	0,0470
$S(\bar{x})$	0,0022	0,0084	0,0063	0,0015	0,0059	0,0019	0,0040	0,0018	0,0055	0,0024
Číslo měření / Zub	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	0,054	0,037	0,009	0,053	0,033	0,020	0,041	0,039	0,081	0,041
2	0,060	0,069	0,053	0,041	0,024	0,015	0,065	0,063	0,101	0,097
3	0,057	0,057	0,044	0,025	0,022	0,027	0,038	0,058	0,081	0,098
4	0,058	0,037	0,047	0,017	0,033	0,025	0,026	0,061	0,077	0,095
5	0,055	0,060	0,043	0,017	0,022	0,024	0,037	0,056	0,071	0,064
6	0,065	0,068	0,045	0,021	0,029	0,024	0,020	0,051	0,061	0,053
7	0,051	0,065	0,043	0,034	0,031	0,030	0,040	0,045	0,065	0,079
8	0,040	0,043	0,042	0,034	0,027	0,026	0,031	0,063	0,083	0,097
9	0,043	0,035	0,029	0,021	0,019	0,030	0,031	0,065	0,074	0,085
10	0,032	0,039	0,039	0,035	0,021	0,025	0,027	0,057	0,085	0,103
Σ	0,515	0,510	0,394	0,298	0,261	0,246	0,356	0,558	0,779	0,812
\bar{x}	0,0515	0,0510	0,0394	0,0298	0,0261	0,0246	0,0356	0,0558	0,0779	0,0812
$S(\bar{x})$	0,0032	0,0044	0,0039	0,0037	0,0016	0,0014	0,0039	0,0027	0,0036	0,0068

Příklad výpočtu:

Aritmetický průměr:

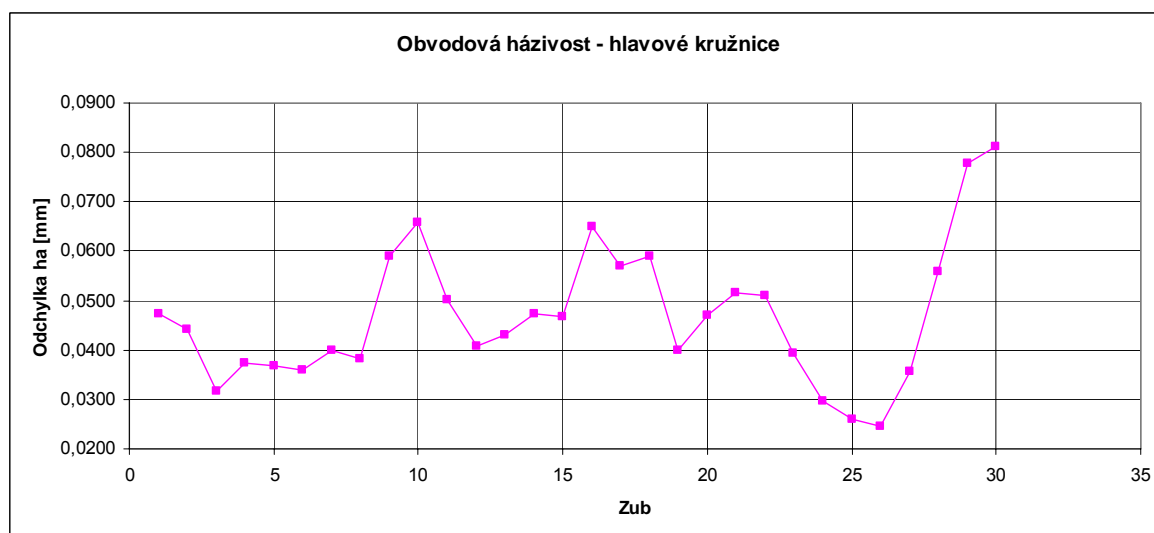
$$\bar{x}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{0,040 + 0,049 + 0,017 + 0,073 + 0,031 + 0,055 + 0,057 + 0,020 + 0,060 + 0,070}{10}$$

$$\bar{x}_1 = \underline{\underline{0,0472 \text{ mm}}}$$
(5.12)

Střední kvadratická odchylka aritmetického průměru:

$$S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{0,00348}{10 \cdot (10-1)}}$$

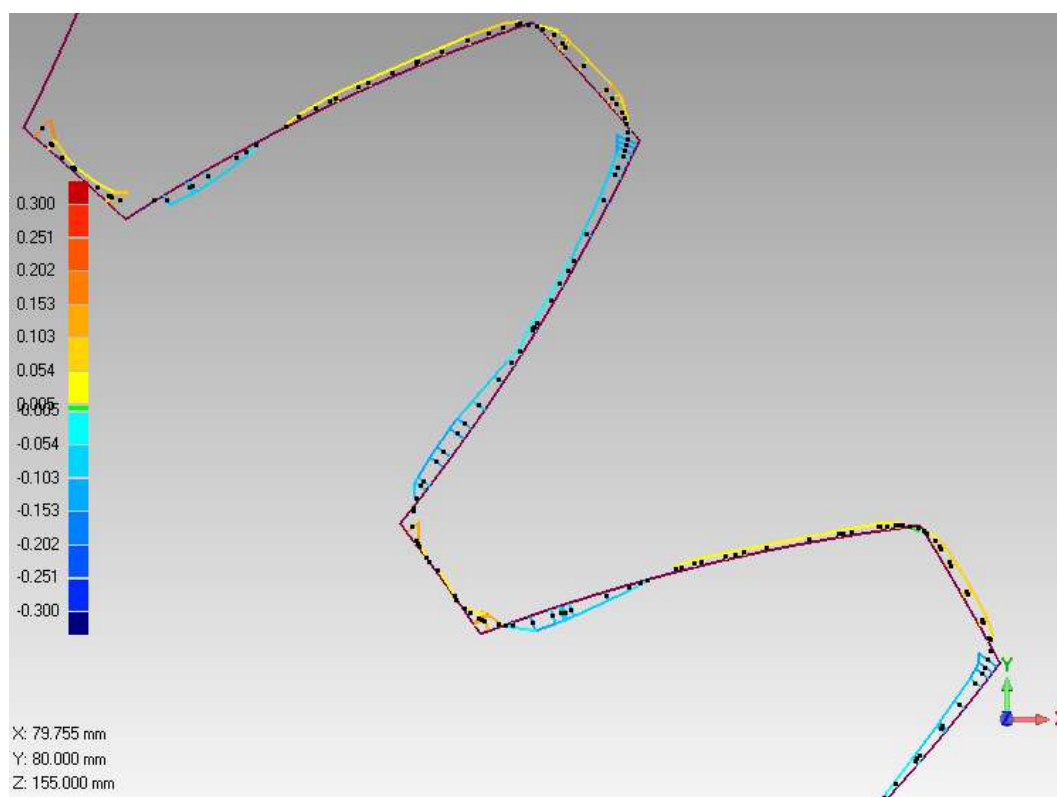
$$S(\bar{x}) = \underline{\underline{0,0062}}$$
(5.13)



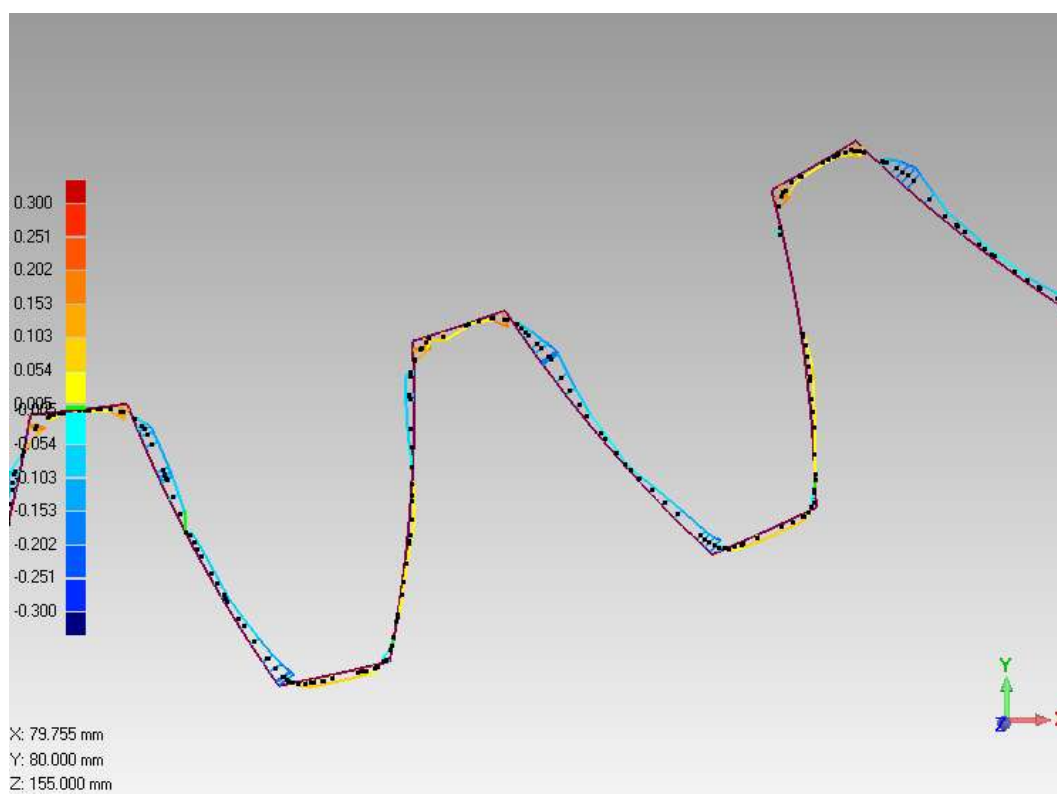
Obr.56. Diagram obvodového radiálního házení na hlavové kružnici při statistickém zpracování

5.4.2.2 Vyhodnocení odchylky evolventy při optickém 3D skenování

Poté následoval 2D řez ozubeným kolem a grafické porovnání aktuálního souboru STL s nominálním souborem CAD.



Obr.57. Grafický záznam odchylky evolventy skutečného tvaru od teoretického



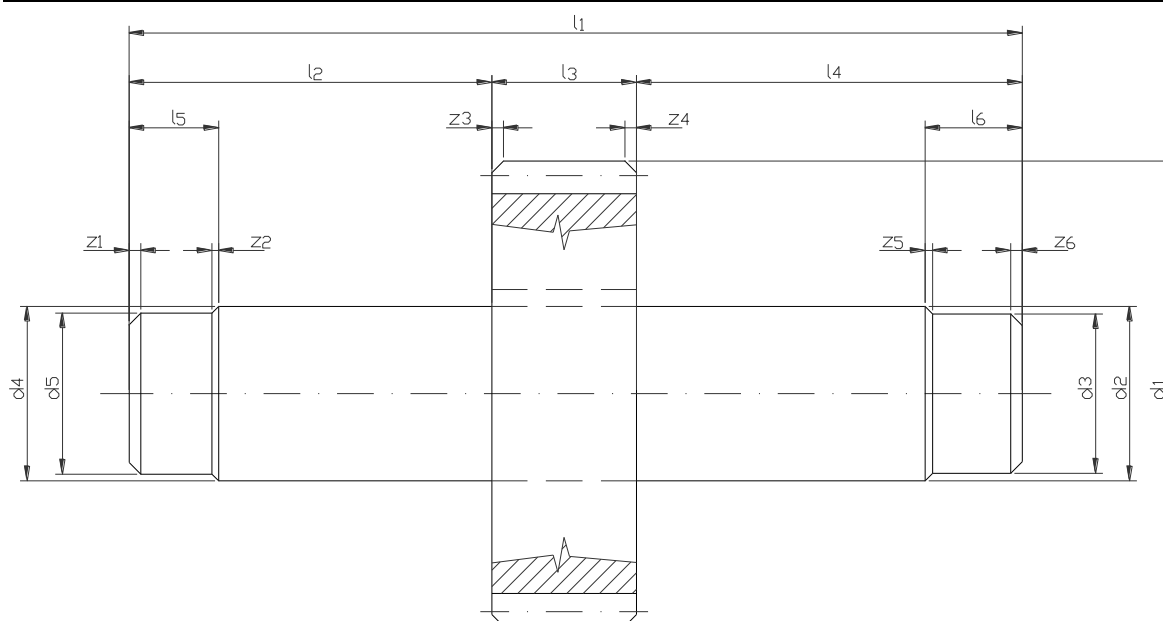
Obr.58. Grafický záznam odchylky evolventy skutečného tvaru od teoretického

6. Vyhodnocení výsledků

Z naměřených hodnot na přístrojích ACTIRIS 350 a Werth – VideoCheck IP 250 3D CNC byla vytvořena tabulka. Ve které jsou porovnány naměřené hodnoty s jmenovitými rozměry ozubeného kola. Je zde možno vidět, že naměřené hodnoty na jednotlivých zařízeních se od sebe moc neliší a ani od jmenovitých rozměrů ozubeného kola. Největší rozdíly naměřených hodnot jsou u zkosení na ozubení, to může být způsobeno opotřebováním ozubeného kola. Z této tabulky taky je patrné, že zařízení Werth – VideoCheck IP 250 3D CNC je výkonnější než zařízení ACTIRIS 350, jelikož bylo možno naměřit více parametrů ozubeného kola.

Tab.12. S naměřenými hodnotami

	JR	ACTIRIS 350	WERTH - VideoCheck 250
l_1	155	154,066	154,2825
l_2	63	62,746	62,7287
l_3	25	24,848	25,0076
l_4	67	66,472	66,5619
l_5	15,5		15,0890
l_6	17		16,4963
z_1	2x45°		1,4201x45,5019°
z_2	1x45°		1,2025x44,0507°
z_3	2x45°		1,1482x68,4731°
z_4	2x45°		1,1734x68,6653°
z_5	1x45°		0,9013x42,9192°
z_6	2x45°		2,1478x45,3901°
d_1	80	80,141	79,9456
d_2	30	30,002	30,0488
d_3	28	28,524	28,3696
d_4	30		29,9714
d_5	28	27,472	27,6712



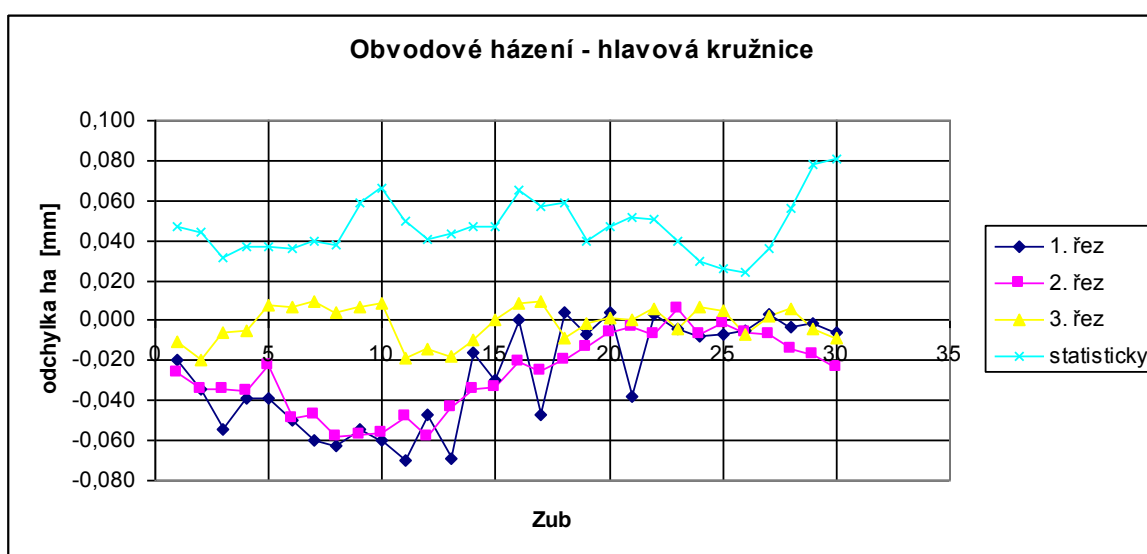
Obr.59. Náčres ozubeného kola

V další tabulce nalezneme porovnaný naměřené hodnoty základní kružnice a celkovou odchylku profilu (evolventy), vždy naměřenou na každém pátém zubě ozubeného kola. Na zařízení WERTH – VideoCheck IP 250 3D CNC bylo vždy naměřeno jen z levé strany zubu naproti na zařízení WERTH – Inspector FQ vždy t pravé a levé strany zubu. Naměřené hodnoty základní kružnice se nějak extrémně neliší od jmenovitého rozměru základní kružnice 70,476 mm. Ale u celkové odchylky profilu se hodnoty liší v desetínách mm a to může být způsobeno průměrem měřicích dotyku. Na zařízení WERTH – VideoCheck IP 250 3D CNC byl použit Ø dotyku 1 mm a na zařízení WERTH – Inspector FQ byl použit Ø dotyku 2 mm.

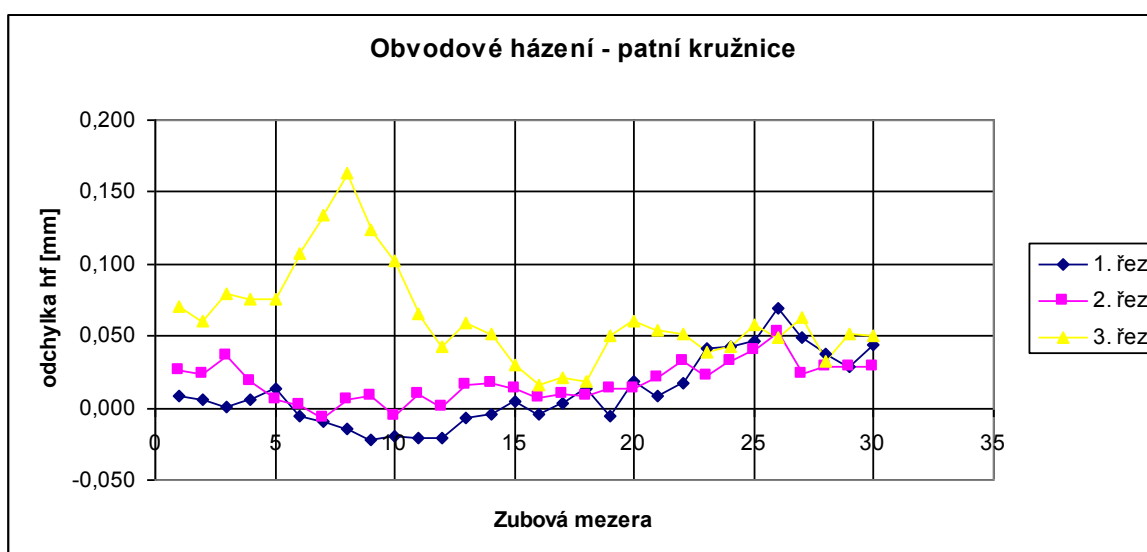
Tab.13. S naměřenými hodnotami

Zub	WERTH - VideoCheck 250		str	WERTH - Inspector FQ	
	D	FT		D	FT
5	70,5971	0,0125	L	70,419	0,019
			P	70,478	0,027
10	70,4786	0,0078	L	70,399	0,023
			P	70,370	0,059
15	70,9528	0,0018	L	70,504	0,019
			P	70,468	0,026
20	70,4228	0,0068	L	70,519	0,021
			P	70,478	0,017
25	69,9972	0,0036	L	70,539	0,016
			P	70,409	0,043
30	70,0371	0,0101	L	70,323	0,039
			P	70,328	0,020

Na *Obr.60.* jsou znázorněny diagramy všech tří řezu naměřených odchylek obvodového radiálního házení na hlavové kružnici při kontaktním měření na zařízení WERTH – Inspector FQ, tak i statisticky zpracován diagram obvodového radiálního házení měřeny opticky na 3D skeneru stereoSCAN 3D – BREUCKMANN. Na tady tomto diagramu jde vidět že hodnoty měření na 3D skeneru a zpracované statisticky jsou mnohým větší. Tato chyba může být způsobená nanesením křídového prachu pro lepší skenování, který udělal setinovou vrstvu na ozubeném kole. Dále zde vidím lišící se průběh v třetím řezu od prvních dvou.



Obr. 60. Diagram obvodového radiálního házení na hlavové kružnici



Obr.61. Diagram obvodového radiálního házení na patní kružnici ve všech řezech

Na *Obr. 61.* jsou znázorněny všechny tři digramy naměřených odchylek obvodového radiálního házení na patní kružnici a jde zde vidět že všechny tři diagramy mají podobný sinusový průběh jen v třetím řezu se průběh liší jak na hlavové kružnici. Patní kružnice nemohla být zpracována statisticky, jelikož při skenování nebyla pořádně naskenována zubová mezera tak by hodnoty byly nepřesné.

Závěr

Tématem diplomové práce bylo porovnání rozměrových parametrů ozubeného kola na opticky měřících zařízeních. Úvodní část nás seznamuje se současným rozdělením ozubených kol. Jsou zde uvedeny základní pojmy ozubení, odchylky ozubených kol a normy týkající se ozubených kol.

V další kapitole je popsán všeobecný přehled a popis při měření dotykovou i optickou metodou. Dále jsou zde zmíněny a popsány různé druhy senzorů v měřících zařízeních a jejich ukázky v podobě obrázku. V této kapitole je ještě obsáhla přesnost měřících zařízení, chyby a nejistoty měření.

Další dvě kapitoly se zabývají principem kontaktního a bezkontaktního měření. Především principem bezkontaktního měření a výstupními daty po 3D skenování.

Pátá kapitola se věnuje experimentální části. Pro měření bylo použito čelní ozubené kolo s přímými zuby nalisované na hřídeli. Ve slovenské Žilině ve firmě SUNGWOO HITECH, s. r. o. bylo uskutečněné měření na přenosném optickém souřadnicovém měřícím stroji ACTIRIS 350. Dále bylo provedené měření na Žilinské univerzitě v Žilině na multisenzorovém měřícím stroji Werth – VideoCheck IP 250 3D CNC. Další měření proběhlo ve firmě PRIMA Bilavčík, s. r. o. v Uherském Brodě na multisenzorovém měřícím stroji Werth – Inspector FQ a na optickém 3D skenu stereoSCAN 3D – BREUCKMANN.

Na zařízení ACTIRIS 350 byly na ozubeném kole měřeny parametry délky a průměru, jelikož zařízení není vhodné na měření ozubení. Při měření na Werth – VideoCheck IP 250 3D CNC byly naměřeny parametry délky, průměru a zkosení pro porovnání s ACTIRIS 350 tak i celkové odchylky profilu (evolventy) zubů. Na zařízení Werth – Inspector FQ bylo proměřeno ozubení ve třech řezech ze kterého se pak dalo vyhodnotit obvodové házení a celkovou odchylku profilu zubů. Na posledním zařízení bylo naskenováno ozubení pro zpracování obvodového házení a celkové odchylky profilu zubů.

Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí softwaru Geomagic Qualify 12 ve kterém byly porovnány s CAD modelem. Dále byly vyhodnoceny do tabulek a grafů.

Podle průběhu měření na všech zařízeních a vyhodnocování sem došel k závěru, že pro měření ozubených kol při výrobě je z hlediska přesnosti měření a efektivnosti lepší použít kontaktní měření ozubení. Optické skenování lze použít a je i vhodnější při měření mikroozubení, kde se dotyk (kulička, hrot) nedostane do zubové mezery a tím by vznikaly nepřesná měření.

Seznam použité literatury

- [1] KREMPA M., *Metrológia v strojárstve, Zborník prednášok: Obrábanie – výborná technika 2000*, Súľov , 2000.
- [2] OBMAŠČÍK M., SLIMÁK S., MADUNA M.: *Riadenie akosti a metrológií*. Bratislava: ALFA Bratislava, 1987, 247 s. 63-738-87.
- [3] OBMAŠČÍK M., *Metrológia chýb a neistôt meradiel dĺžok*, MASM Žilina, 1998
- [4] DURAKBASA M., AFJEHI-SADAT A., OSANNA P., *Neistoty merania*, dostupný na internete
<http://www.kam.sjf.stuba.sk/KATEDRA/publikacie/leonardo/ucebnica/27s.pdf>
- [5] RŮŽIČKA V. *Kontrola ozubených kol s úvodem do geometrického výpočtu ozubení*. Praha: SNTL Praha, 1957, 408 s.
- [6] MEDVECKÝ Š., ČILLÍK L., BARYSZ I., ŽARNAY M., HRČEKOVÁ A., BRONČEK J., KUČERA Ľ., *Základy konštruovania*. Žilina: EDIS Žilina, 1999, 599 s., ISBN 80-7100-547-9.
- [7] DOVICA M., a kol., *Metrolódia v strojárstve*, Košice: EMILENA, 2006, 351 s., ISBN 80-8073-407-0.
- [8] CHRISTOPH, Ralf; NEUMANN, Hans Joachim. *Multisenzorová souřadnicová technika*. Uherský Brod : L.V. Print, 2008. 106 s. Publikováno firmou Prima Bilavčík, s.r.o.
- [9] KADLČÍK, Rostislav. *Reverzní inženýrství pro 3D počítačovou grafiku*. Přerov, 2010. 41 s. Bakalářská práce. Vysoká škola logistiky o.p.s.
- [10] *Přístroje pro měření a metrologii*; publikované firmou Prima Bilavčík, s.r.o.; Uherský Brod : [s.n.], 2011. 72 s.

Seznam příloh

Příloha č. 1.	Protokol z měření na ACTIRIS 350.....	2
Příloha č. 2.	Záznam kontur zkosení a úhly zkosení z Werth – VideoCheck IP 250 3D CNC.....	4
Příloha č. 3.	Kalibrační protokol referenčního a měřicího dotyku na Werth – Inspector FQ.....	6
Příloha č. 4.	Graficky záznam odchylky profilu ve všech třech řezech.....	8
Příloha č. 5.	Postup skenování ozubeného kola na steroSCAN 3D – BREUCKMANN.....	10
Příloha č. 6.	Výkres ozubeného kola	

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Robertu Čepovi, Ph. D. a konzultantce Ing. Lence Čepové, Ph. D. za podmětné rady a odborné vedení při zpracování diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat firmám SUNGWO HITECH s.r.o. a PRIMA Bilavčík s.r.o. a Žilinské univerzitě, Fakultě strojní, že mi poskytla měřicí zařízení pro vytvoření experimentální části.